

旋转黑子的太阳周时间延迟研究*

石祥军^{1,2†} 李可军¹ 闫晓理^{1,2} 高朋鑫^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台 / 云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 统计结果显示 23 周旋转黑子的纬度随时间的变化呈蝴蝶图分布. 对 23 周旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图两翼的 4 条拟合曲线间的均方差随相位变化进行研究的结果表明: 黑子蝴蝶图南北半球之间、旋转黑子蝴蝶图南北半球之间以及在同一半球旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图之间存在着系统的时间延迟. 这说明: 23 周南北半球太阳黑子活动不是同时发生的, 南半球和北半球之间存在着系统的时间延迟或提前 (相位差), 且是南半球滞后于北半球; 23 周旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图之间存在着相位差, 且是旋转黑子蝴蝶图滞后于黑子蝴蝶图, 观测滞后值略小于发电机模型预言的理论值.

关键词 太阳: 活动, 太阳: 黑子, 方法: 数据分析

中图分类号: P 182; **文献标识码:** A

1 引言

黑子旋转问题是太阳物理中的重要课题^[1]. 对旋转黑子的观测和研究已有很长的历史, Hale^[2] 和 Evershed^[3] 在 20 世纪初就已观测到个别黑子会发生旋转^[4]. 随着高时间分辨率和高空间分辨率的空间太阳观测设备的发展, 旋转黑子更容易被辨别和记录. Brown 等^[5] 利用 TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) 的白光像辨别旋转黑子并分析了几个个例. 日震学观测结果表明黑子的旋转不仅在光球层还深入光球层以下^[6]: 从光球层向下直到约 7 Mm 处有与旋转黑子同向的涡流存在, 而在超过 7 Mm 后, 涡流的方向则与黑子旋转的方向相反^[6-9]. López Fuentes 等^[10] 认为旋转黑子的产生有 3 个可能的原因: (1) 对流层底部扭曲不稳定性非线性演化会形成非平面磁流管, 当非平面磁流管浮出光球层时就可以观测到旋转黑子; (2) 磁流管经过对流层时受到科里奥利力的作用; (3) 伴随着对流层内大尺度涡旋运动的磁流管间的相互作用^[11]. Gibson 等^[12] 认为扭曲磁流管的浮现会导致旋转黑子的产生. Su 等^[11] 认为洛伦兹力也是引起黑子旋转的可能原因. 黑子的旋转通常与许多太阳爆发事件相联系. 黑子的旋转往往伴随着耀斑的出现^[1,5,8,13-16]. Hiremath 等^[17-18] 通过计算 1969 到 1974 年间不同寿命黑子的每日旋转速度, 进一步指出无论是前导黑子还是后随黑子或是双极黑子的反常旋转速率最终

2009-10-09 收到原稿, 2010-01-08 收到修改稿

* 国家科技部 973 计划 (2006CB806303)、国家自然科学基金 (10583032, 40636031) 和云南省科学基金 (09YJ031001) 资助

† shixiangjun@ynao.ac.cn

都会引起耀斑的爆发. Yan 等^[19-20]认为黑子不同部分的较差转动会使活动区的磁场发生扭转, 扭曲的磁结构从光球经过色球进入日冕, 进而引起耀斑的爆发. CME (coronal mass ejection, 日冕物质抛射) 的爆发也可能与黑子的旋转有关^[15-16,21]. 此外, 黑子的旋转也是螺度的产生和注入的主要驱动源^[21]. 黑子绕其本影中心的旋转^[5]和双极黑子之间的相对旋转^[22]都可能与螺度的注入有关^[21].

近年来, 人们发现南北半球的太阳活动存在着略微的异步^[23-26], 且南北半球太阳活动的不对称性与太阳半球活动的相位移有关^[27-30]. 为了更好地了解太阳半球活动的相位移及其与南北半球太阳活动不对称性的关系, Li^[31]研究了月平均黑子数、月平均黑子面积、月黑子群数、月平均耀斑数和每个卡林顿旋转的太阳暗条数在 5 个太阳活动周中的活动指数, 指出南北半球的太阳活动不是同时发生的, 在每个太阳周都存在着系统的时间延迟.

Xu 等^[32]研究了由简单 Park 发电机模型预言的磁螺度和电流螺度的演化, 指出螺度和环向场(黑子蝴蝶图)之间存在着 $\frac{\pi}{4}$ 的相位差, 螺度的相位滞后于环向场.

本文分析了旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图之间的关系, 研究了黑子蝴蝶图和旋转黑子蝴蝶图南北半球间的相位差以及旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图间的相位差.

2 旋转黑子的时间延迟研究

2.1 观测资料

23 周旋转黑子的主要数据来源^[33]: (1) TRACE 的约 1 min 1 张的白光像; (2) SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 的 MDI (Michelson Doppler Imager) 观测的每 96 min 1 张的磁图和全日面白光像; (3) Hinode (Solar-B) 的白光像和矢量磁图.

黑子群的观测数据从皇家格林威治天文台、美国空军和美国国家海洋与大气管理局太阳黑子记录数据集¹获得.

2.2 旋转黑子和黑子蝴蝶图的比较分析

我们利用 Yan 等^[33]统计的从 1997 年 6 月到 2007 年 6 月的旋转黑子数据, 在 23 周黑子蝴蝶图的基础上添加了旋转黑子蝴蝶图(如图 1 所示). 然后对旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图两翼的数据点作二次曲线拟合, 拟合曲线分别为: $y_1 = 0.0839947x^2 - 337.89x + 339819$, 对应于旋转黑子蝴蝶图的北半球(红色实线), 相关系数为 $-0.495\ 629$; $y_2 = -0.137993x^2 + 554.181x - 556410$, 对应于旋转黑子蝴蝶图的南半球(红色虚线), 相关系数为 0.60775 ; $y_3 = 0.15186x^2 - 609.759x + 612095$, 对应于黑子蝴蝶图的北半球(绿色实线), 相关系数为 $-0.508\ 079$; $y_4 = -0.063188x^2 + 254.729x - 256724$, 对应于黑子蝴蝶图的南半球(绿色虚线), 相关系数为 $0.522\ 341$.

分别对这 4 条拟合曲线选取 1998 年到 2007 年间的 108 个点, 相邻 2 个点间的间隔为 1 个月. 利用这些数据点, 我们研究了黑子蝴蝶图两翼的拟合曲线、旋转黑子蝴蝶图两翼的拟合曲线、旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图在北半球的拟合曲线、旋转黑子蝴蝶图

¹ <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>

和黑子蝴蝶图在南半球的拟合曲线, 这 4 组拟合曲线间的偏离程度 (均方差) 随时间的变化, 得到图 2~5. 其中, 图 2~3 的正值表示蝴蝶图的南半球滞后于北半球; 图 4~5 的正值表示旋转黑子蝴蝶图提前于黑子蝴蝶图. 由图 2 可以看到, 23 周黑子蝴蝶图的南半球比北半球延迟 6 个月, 这与 Li^[31] 的月黑子群数南半球比北半球延迟 6 个月的结果相一致, 这说明我们的方法是可靠的. 由图 3 可以看到, 旋转黑子蝴蝶图的南半球比北半球延迟了 15 个月. 由图 4 可以看到, 在北半球, 旋转黑子蝴蝶图比黑子蝴蝶图延迟了 7 个月. 而在南半球, 旋转黑子蝴蝶图比黑子蝴蝶图延迟了 14 个月 (见图 5).

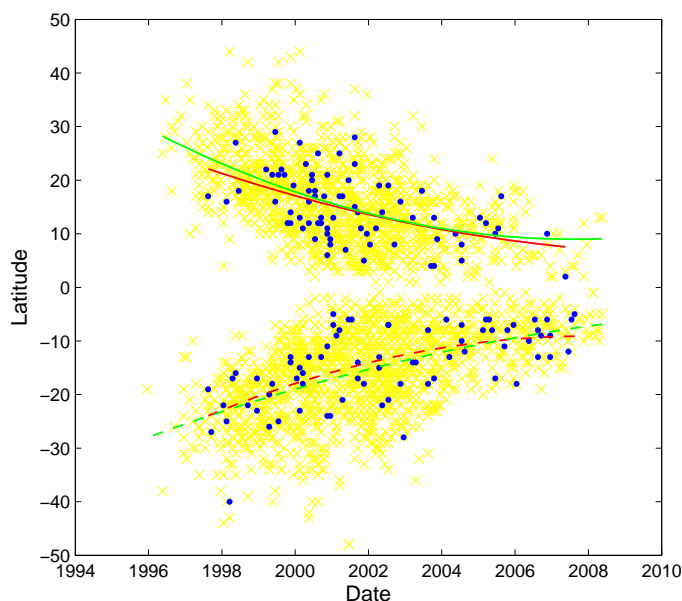


图 1 23 周旋转黑子和黑子的蝴蝶图. 其中黄色交叉符号是黑子蝴蝶图, 蓝色的实心圆点表示旋转黑子蝴蝶图. 红色实线是旋转黑子蝴蝶图北半球的二次拟合曲线, 红色虚线是旋转黑子蝴蝶图南半球的二次拟合曲线, 绿色实线是黑子蝴蝶图北半球的二次拟合曲线, 绿色虚线是黑子蝴蝶图南半球的二次拟合曲线

Fig. 1 The butterfly diagram of rotating sunspots and the butterfly diagram of sunspots in cycle 23. The yellow cross symbols indicate the butterfly diagram of sunspots, the blue dots indicate the butterfly diagram of rotating sunspots. The red solid (dashed) line stands for the curve-fitting of second order for the northern (southern) hemisphere of the butterfly diagram of rotating sunspots, the green solid (dashed) line stands for the curve-fitting of second order for the northern (southern) hemisphere of the butterfly diagram of sunspots

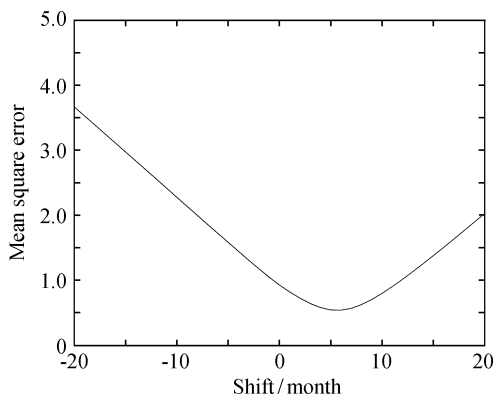


图 2 23 周黑子蝴蝶图两翼拟合曲线间的均方差随相位的变化

Fig.2 The change of mean square error between the two wings of the butterfly diagram of sunspots with the phase in cycle 23

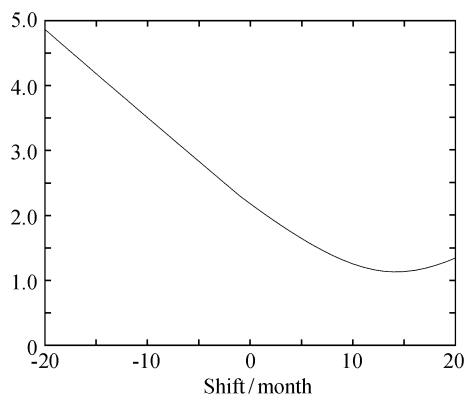


图 3 23 周旋转黑子蝴蝶图两翼拟合曲线间的均方差随相位的变化

Fig.3 The change of mean square error between the two wings of the butterfly diagram of rotating sunspots with the phase in cycle 23

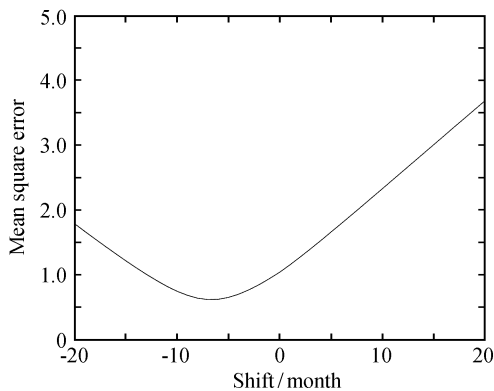


图 4 23 周北半球旋转黑子蝴蝶图拟合曲线和黑子蝴蝶图拟合曲线间的均方差随相位的变化

Fig.4 The change of mean square error between the butterfly diagram of rotating sunspots and the butterfly diagram of sunspots with the phase in the solar northern hemisphere in cycle 23

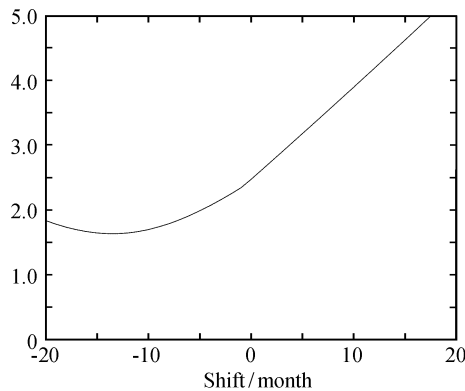


图 5 23 周南半球旋转黑子蝴蝶图拟合曲线和黑子蝴蝶图的拟合曲线间的均方差随相位的变化

Fig.5 The change of mean square error between the butterfly diagram of rotating sunspots and the butterfly diagram of sunspots with the phase in the solar southern hemisphere in cycle 23

3 结论与讨论

通过旋转黑子蝴蝶图和黑子蝴蝶图之间关系的研究, 我们得出如下结论:

(1) 南北半球间的太阳黑子活动存在相位差. 23 周黑子蝴蝶图的南半球比北半球延迟了 6 个月; 23 周旋转黑子蝴蝶图的南半球比北半球延迟了 15 个月.

黑子活动在南北半球上存在活动强度的不对称性, 在相位上存在时间延迟, 且二者按不同规律变化. 因此, 我们推测太阳黑子活动在南北半球上由不同且相关联的物理过程控制(浮现).

(2) 旋转黑子蝴蝶图滞后于黑子蝴蝶图. 在北半球, 旋转黑子蝴蝶图比黑子蝴蝶图延迟了 7 个月; 在南半球, 旋转黑子蝴蝶图比黑子蝴蝶图延迟了 14 个月.

旋转黑子蝴蝶图相对于黑子蝴蝶图的延迟与由简单 Park 发电机模型推得的螺度相对于环向场(黑子蝴蝶图) $\frac{\pi}{4}$ (约为 17 个月) 的位相延迟的预言不完全一致, 观测滞后值略小于发电机模型预言的理论值. 这说明旋转黑子掺杂了螺度和非螺度的成份.

致谢 感谢审稿人的意见和建议. 感谢 TRACE、SOHO、皇家格林威治天文台、美国空军和美国国家海洋与大气管理局提供的数据.

参 考 文 献

- [1] Gopasyuk S I, Gopasyuk O S. SoPh, 2005, 231: 11
- [2] Hale G E. ApJ, 1908, 28: 100
- [3] Evershed J. MNRAS, 1910, 70: 217
- [4] Knoška Š. BAICz, 1975, 26: 151
- [5] Brown D S, Nightingale R W, Alexander D, et al. SoPh, 2003, 216: 79
- [6] Botha G J J, Busse F H, Hurlburt N E, et al. MNRAS, 2008, 387: 1445
- [7] Kosovichev A G. AN, 2002, 323: 186
- [8] Zhao J W, Kosovichev A G. ApJ, 2003, 591: 446
- [9] Gizon L, Birch A C. LRSP, 2005, 2: 6
- [10] López Fuentes M C, Démoulin P, Mandrini C H, et al. A&A, 2003, 397: 305
- [11] Su J T, Liu Y, Liu J H, et al. SoPh, 2008, 252: 55
- [12] Gibson S E, Fan Y, Mandrini C, et al. ApJ, 2004, 617: 600
- [13] Stenflo J O. SoPh, 1969, 8: 115
- [14] Barnes C W, Sturrock P A. ApJ, 1972, 174: 659
- [15] Tokman M, Bellan P M. ApJ, 2002, 567: 1202
- [16] Zhang J, Li L P, Song Q. ApJ, 2007, 662: L35
- [17] Hiremath K M, Suryanarayana G S. A&A, 2003, 411: L497
- [18] Hiremath K M, Suryanarayana G S, Lovely M R. A&A, 2005, 437: 297
- [19] Yan X L, Qu Z Q. A&A, 2007, 468: 1083
- [20] Yan X L, Qu Z Q, Xu C L, et al. RAA, 2009, 9: 596
- [21] Tian L R, Alexander D. SoPh, 2006, 233: 29
- [22] Tian L R, Liu Y, Yang J, et al. SoPh, 2005, 229: 237
- [23] Zolotova N V, Ponyavin D I. A&A, 2006, 449: L1

- [24] Zolotova N V, Ponyavin D I. *SoPh*, 2007, 243: 193
- [25] Donner R, Thiel M. *A&A*, 2007, 475: L33
- [26] Li Q X. *SoPh*, 2008, 249: 135
- [27] Waldmeier M. *ZA*, 1957, 43: 149
- [28] Waldmeier M. *SoPh*, 1971, 20: 332
- [29] Temmer M, Veronig A, Hanslmeier A. *A&A*, 2002, 390: 707
- [30] Temmer M, Rybák J, Bendík P, et al. *A&A*, 2006, 447: 735
- [31] Li K J. *SoPh*, 2009, 255: 169
- [32] Xu H, Gao Y, Popova E P, et al. *ARep*, 2009, 53: 160
- [33] Yan X L, Qu Z Q, Xu C L. *ApJ*, 2008, 682: L65

Solar-cycle Time Delay of Rotating Sunspots

SHI Xiang-jun^{1,2} LI Ke-jun¹ YAN Xiao-li^{1,2} GAO Peng-xin^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The statistical results indicate that the distribution of rotating sunspots varying with latitude and time in cycle 23 also shows the butterfly pattern. The changes of mean square errors among the four curve-fitting of second order for the two wings of the butterfly diagram of sunspots and the two wings of the butterfly diagram of rotating sunspots in cycle 23 with the phase are studied. The results are used to show a systematic time delay between northern and southern hemispheric sunspots activities in cycle 23, a systematic time delay between northern and southern hemispheric rotating sunspots activities in cycle 23, and a time delay between rotating sunspots and sunspots activities in the same hemispheres. It is confirmed that sunspots activity does not occur synchronously in the northern and southern hemispheres, and there is a systematic time lag or lead (phase shift) between northern and southern hemispheric sunspots activity in cycle 23, with southern hemispheric sunspots activity lagging behind northern hemispheric sunspots activity. It is also found that there is a phase shift between the butterfly diagram of rotating sunspots and the butterfly diagram of sunspots, with the butterfly diagram of rotating sunspots lagging behind the butterfly diagram of sunspots, and the lag is smaller than the theoretical result predicted by the solar dynamo model.

Key words sun: activity, sun: sunspots, methods: data analysis