

基于SDO/AIA紫外图像的太阳较差自转研究*

曾曙光^{1,2} 金汉乐^{1,2} 邓林华³ 吴前锐⁴ 曾祥云^{1,2†}
郑胜^{1,2} 黄瑶^{1,2} 刘德剑^{1,2}

(1 三峡大学天文与空间科学研究中心 宜昌 443002)

(2 三峡大学数理学院 宜昌 443002)

(3 云南民族大学数学与计算机科学学院 昆明 650504)

(4 云南大学中国西南天文研究所 昆明 650500)

摘要 太阳的较差自转是将极向磁场转化为环向磁场的关键机制. 采用通量调制法对太阳动力学观测台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 上大气成像仪 (Atmospheric Imaging Assembly, AIA) 的 1600 Å 等波段的太阳全日面紫外图像进行了较差自转研究. 首先, 对全日面图像进行了预处理并将其划分为不同的纬度区域. 然后, 经过数据处理得到各纬度区域的通量时间序列. 最后, 对各纬度区域通量时间序列进行自相关分析以得到各纬度的自转周期和自转角速度. 研究结果表明: 在 80°S 到 80°N 的纬度范围内, 太阳的自转角速度是关于纬度变化的函数; 在 AIA 不同波长下, 随着高度增加太阳赤道自转角速度变大, 而较差自转程度减弱; 赤道附近平均自转角速度及较差自转程度与太阳活动周无明显关系.

关键词 太阳: 自转, 太阳: 活动, 太阳: 紫外辐射, 方法: 数据分析, 自相关
中图分类号: P182; **文献标识码**: A

1 引言

太阳的较差自转为太阳发电机理论提供了至关重要的动力学基础, 在太阳内部磁场结构的转化中起着关键作用. 太阳较差自转与磁场之间的相互作用影响着太阳活动及其各种表现形式^[1-3]. 研究较差自转变化的模式还可以为太阳活动周期以及较差自转产生机制的理论研究提供依据. 研究人员还发现了太阳自转与地球大气臭氧之间的密切关系, 这有助于更好地理解太阳对地球活动的影响^[4-5].

迄今为止, 已有多种方法用于研究太阳的自

转角速度. 最先用来研究太阳自转角速度的方法是示踪物法^[6-7]. 这种方法通过观测具有缓慢变化特征结构的位置变化来确定自转速度. Howard^[2] 和 Arevalo 等^[8] 通过观测太阳黑子, 进行了关于太阳较差自转的长期研究. 除了太阳黑子, 其他太阳特征如光斑、谱斑和暗条等也可以作为示踪物来计算太阳自转角速度^[9-11]. 其次是光谱测量法, 它基于光谱特征的多普勒谱线的位移来确定太阳自转角速度^[12]. Livingston^[13] 使用光谱方法来确定太阳外层大气的较差自转, 发现较差自转随高度增加而增加. 示踪物方法适用于研究低纬度带内磁场结构出现位置的较差自转, 而光谱法可以更好

2025-01-20收到原稿, 2025-05-12收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U2031202、12203029)资助

†xyzeng2018@ctgu.edu.cn

地应用于高纬度区域^[14]. 近年来, 在太阳自转研究领域通量调制法得到广泛应用^[15-16]. 通量调制方法具有高度的灵敏性, 能够检测太阳表面亮度的微小变化, 适用于不同波长的观测数据. 通过提取太阳观测图像中的通量信息, 并对通量时间序列数据进行自相关分析, 确定太阳的自转周期. Chandra等^[17-18]利用太阳全日面图像的通量来研究日冕的自转速度. Sharma等^[19]利用太阳动力学观测台上大气成像仪(The Atmospheric Imaging Assembly Solar on the Dynamics Observatory, SDO/AIA)图像的通量来研究不同日冕层的太阳自转周期, 这些周期随着温度(或高度)的增加而减少. Li等^[20]利用通量调制方法研究色球层的自转特征, 表明随着磁场强度的增加, 较差自转程度加剧.

太阳是一个由等离子体构成的恒星, 不仅在其表面不同纬度之间的自转角速度存在差异, 而且自转角速度还随高度(或温度)变化^[21]. Wan等^[22]利用科英布拉大学的地球物理与天文观测站(Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra, OGAUC) 1929年至1941年的太阳暗条观测数据, 发现在中低纬度区域高色球层暗条的自转角速度大于光球层和中低色球层的自转角速度. Sharma等^[23]利用2011年至2021年从SDO/AIA获得的19.3 nm波长的高分辨率观测数据, 发现日冕的自转角速度随纬度变化, 日冕赤道区域的平均自转角速度高于光球层、色球层和过渡区. Sharma等^[16]使用日地关系观测台(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO)的极紫外304 Å图像, 获得了过渡区的自转轮廓系数, 并发现过渡区赤道的自转角速度比日冕更快, 但过渡区自转角速度梯度的绝对值小于日冕. 同样, Wu等^[24]使用SDO/AIA 304 Å图像进行研究, 揭示了太阳过渡区赤道的自转角速度比日冕和色球层观测到的速度要小. Kharayat等^[25]使用来自柯达金纳尔天文台的数字化Ca-K图像, 对1907年至1996年的太阳自转进行了研究, 利用谱斑得到赤道的自转角速度为 $13.98\text{ (}^\circ\text{)}\cdot\text{d}^{-1}$, 从纬度 0° 到 80° 自转角速度呈现出下降趋势.

太阳自转角速度与太阳活动周之间的关联性目前尚无定论. 研究太阳活动周期中太阳自转的变化, 有助于我们理解太阳活动周期的机制^[2-3]. 有

研究者认为太阳自转的变化与太阳活动周的变化是同步的^[26]. 然而, Chandra等^[18]指出日冕赤道的自转角速度相对于年平均国际太阳黑子数(Sunspot Number, SSN)表现出系统性变化, 但其梯度与SSN呈反相关. Li等^[27-28]观察到, 长期太阳黑子活动的周期性变化与太阳赤道自转之间存在负相关关系, 太阳在赤道的自转角速度越快, 太阳黑子活动的水平就越低.

在本文中, 基于2011年至2023年SDO/AIA图像数据, 采用通量调制方法研究了太阳的较差自转特性. 第2节提供了数据介绍和预处理; 在第3节中, 介绍了自相关方法获取周期; 第4节中对结果进行了讨论, 重点关注3个方面: 太阳的较差自转轮廓、不同波长对应的自转角速度随高度变化、自转角速度与太阳活动周之间的关系; 第5节中进行了总结与讨论.

2 数据

2.1 数据来源

SDO于2010年2月发射升空, 并于同年5月开始返回科学数据. AIA由4个望远镜构成, 能够观测波长范围从94 Å到4500 Å的10个通道的太阳图像, 对应从光球到日冕的高度范围^[29]. 温度范围从5000 K到20 MK, 包括各种离子如CIV、FeXVI、HeII、FeIX等. 本文使用的数据是来自SDO/AIA的1600 Å、1700 Å、304 Å、131 Å、171 Å、193 Å、211 Å、335 Å、94 Å的图像. 其中1600 Å、1700 Å属于紫外波段, 其他波长属于极紫外波. 1600 Å图像代表了太阳的过渡区和上光球^[30], 成像光谱主要由CIV离子发出的双谱线、连续谱以及许多其他色球线组成, 其特征发射温度达到大约 10^5 K ^[31]. 211 Å等极紫外波段主要是Fe的各种离子形成的谱线. 在这个光谱范围内进行观测和成像是获取太阳物理信息和特征的重要且有效的方法. 通过SDO的官方网站, 下载了2011年至2023年间分辨率为 1024×1024 的9个波长的观测图像. 每日挑选一张相近时刻的图像, 共计42000多张图像作为本研究的实验数据.

2.2 数据预处理

由于观测到的太阳图像边缘比中心略显暗淡,

这可能会影响实验结果^[32]. 因此, 有必要从这些图像中去掉临边昏暗效应. 具体处理步骤如下: 首先, 采用边缘检测算法(如Canny算子)拟合太阳圆盘轮廓, 精确计算太阳圆盘中心坐标和半径. 然后, 将图像从笛卡尔坐标系转换为以太阳中心为原点的极坐标系. 在极坐标系中, 每个角度的径向轮廓值构成一个径向轮廓曲线. 用在360°范围内平滑的中值轮廓曲线替换整个图像的轮廓曲线. 转换回笛卡尔坐标系后, 可以获得一个平静的背景图像. 最后, 通过减去背景图像, 可以得到质量较好的去除临边昏暗效应的图像^[33]. 在对图像进行亮度均衡之后, 从全日面图像中提取太阳圆盘. 接下来, 将从80°S到80°N的太阳圆盘划分为16个纬度带. 由于太阳赤道面与黄道面之间存在7.2°的交角, 需要将太阳图像坐标转化到经纬度坐标, 以纬度大小为索引, 每隔10个纬度提取相应纬度区域内的通量. 如图1所示椭圆形曲线即为1600 Å图像的纬线划分示意图, 从赤道到极点, 以10°间隔区域为一个纬度带. 北半球和南半球超过80°的部分非常狭窄, 包含的信息特征较少, 因此不予考虑. 然后, 提取每个小纬度带中的平均紫外通量, 得到每个纬度带的平均通量时间序列.

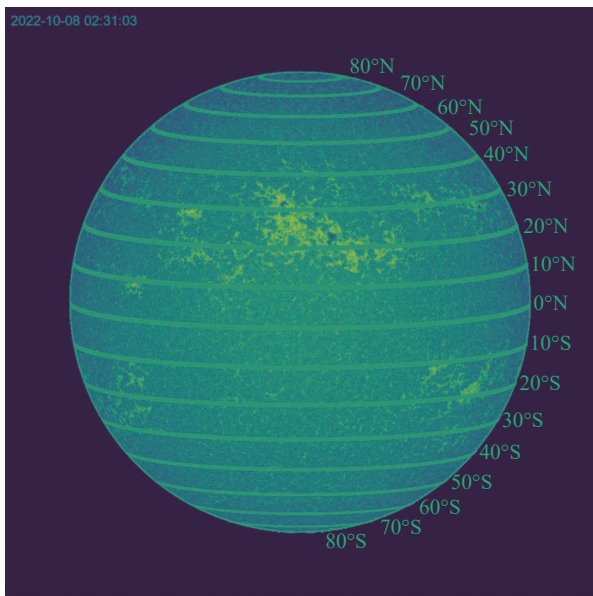


图1 SDO/AIA 1600 Å太阳全日面纬度带划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the full-disk latitude band division of the Sun in SDO/AIA 1600 Å

图2中的黑色实线显示了原始通量时间序列, 可以观察到原始数据均值存在较大波动, 0-150 d的通量整体偏大. 为了防止通量均值的趋势性变化影响后续的周期分析, 有必要对通量时间序列进行处理以消除趋势性变化. 首先, 用一个多项式对原始通量时间序列进行拟合, 多项式拟合的阶数为8, 并计算原始通量时间序列的均值. 然后, 通过从原始数据中减去均值再加上拟合值, 获得了一个更平稳的时间序列. 在图2中, 黑色虚线代表通过多项式拟合获得的通量时间序列, 横轴表示时间. 图3显示了去趋势后的通量时间序列. 与图2中的曲线相比, 图3中曲线的均值已经没有了显著的趋势变化.

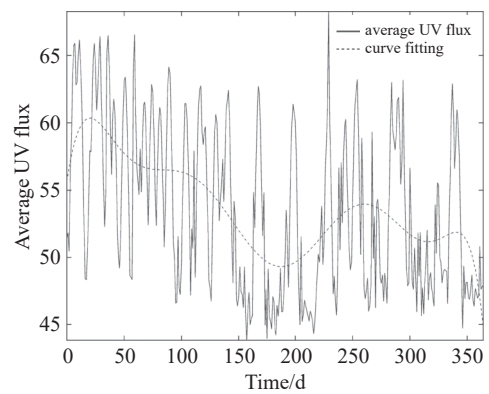


图2 原始通量序列及其拟合曲线

Fig. 2 The original flux series and its fitted curve

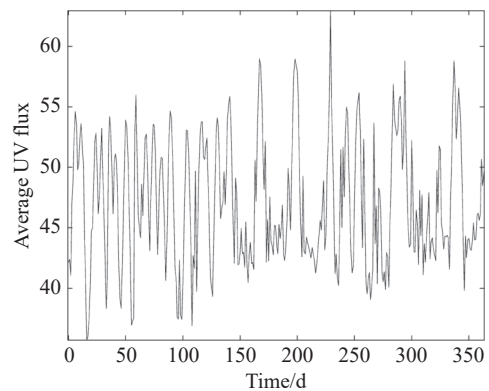


图3 去趋势后的通量序列

Fig. 3 The flux series after detrending

通过对图3中的通量序列进行傅里叶变换, 得

到振幅谱如图4所示. 由图可见, 提取的流量时间序列包含多个频率成分. 对振幅谱应用巴特沃斯带通滤波器进行滤波, 去除其他噪声成分. 带通滤波的通带范围是 $0.02 - 0.1 \text{ d}^{-1}$, 这对应于10–50 d的周期. 然后对滤波后的振幅谱进行逆傅里叶变换, 得到了带通滤波后的时间序列, 如图5所示, 与滤波前的图3相比, 曲线变得更加平滑, 噪声更少.

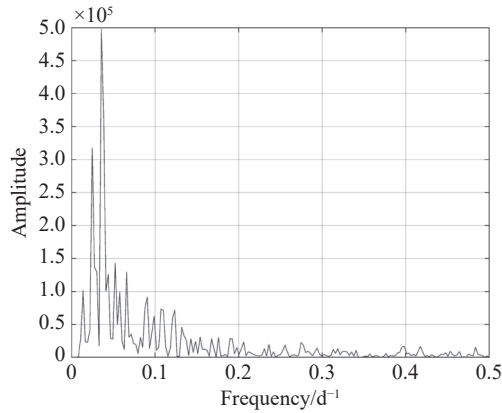


图 4 流量时间序列经过傅里叶变换后的振幅谱

Fig. 4 Amplitude spectrum of the flux time series after Fourier transform

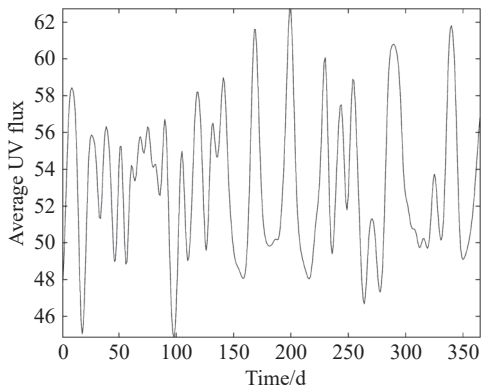


图 5 经过带通滤波后的流量序列

Fig. 5 The flux series after band-pass filtering

3 分析方法

自相关函数(Autocorrelation Function, ACF)描述了随机信号不同时间点之间的相关程度, 有助于识别信号中的重复模式. 对于离散时间

序列 $y_t (t = 0, 1, 2, 3, \dots)$, 可以设置滞后值来计算其自相关系数. 自相关图中对应第1个次级峰的滞后值代表太阳自转周期^[16]. 自相关系数计算公式为:

$$\text{ACF}(h) = \frac{\text{Cov}(y_t, y_{t-h})}{\text{Var}(y_t)}, \quad (1)$$

其中 $\text{ACF}(h)$ 表示时间序列在时间滞后 h 时的自相关系数, $\text{Cov}(y_t, y_{t-h})$ 表示时间序列在时间 t 和 $t-h$ 时的协方差, $\text{Var}(y_t)$ 表示时间序列在时间 t 时的方差.

对预处理后的平均流量时间序列进行自相关系数计算, 设定滞后值在0–150 d的范围内变化. 图6展示了2022年南半球50°S的自相关图, 其中横轴表示天数, 纵轴表示相应的自相关系数.

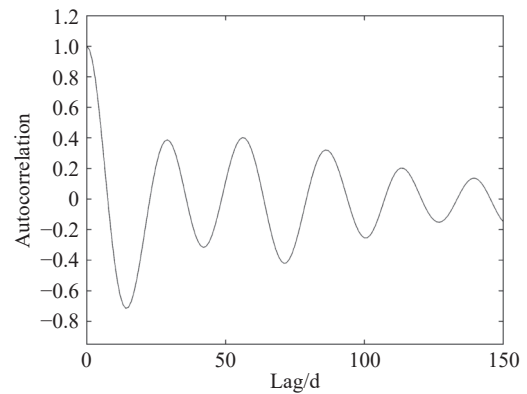


图 6 2022年50°S处流量的自相关图

Fig. 6 Autocorrelation plot of flux at 50°S in 2022

在50°S自相关图中显示出多个明显的峰值结构, 每个峰值对应于滞后轴上的不同周期. 由图可见, 第1个次级峰值比其他峰值更高, 相关系数更大, 表明其统计显著性并暗示存在一个稳定的周期^[16]. 为了获得更精确的周期值, 选择第1个次级峰值进行高斯拟合, 高斯函数能更好地描述自相关峰的形状, 其中心位置对应自转周期的统计最优估计, 可更好地确定太阳自转周期. 高斯拟合公式如下:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}}, \quad (2)$$

式中, b 是高斯函数的中心, 它决定了峰值出现的位置, 对应于自转周期; a 是高斯函数的振幅, c 是标准差. 图7中的黑线表示使用此高斯函数拟合

2022年50°S纬度的数据所得到的拟合曲线, 三角形点表示原始数据点, 垂直虚线对应于高斯函数的中心值. 在图7中, 2022年50°S纬度的拟合优度R-square为0.99, 峰值处对应的自转周期为27.31 d, 也称为太阳的会合周期 T_{synodic} . 会合周期不能直接用来计算太阳自转角速度, 转换为恒星自转周期 T_{sidereal} , 即:

$$T_{\text{sidereal}} = \frac{365.26 \times T_{\text{synodic}}}{365.26 + T_{\text{synodic}}}, \quad (3)$$

其中365.26是SDO卫星的轨道周期^[19]. 太阳自转的角速度 ω 与太阳的恒星自转周期之间的关系如下:

$$\omega = \frac{360^\circ}{T_{\text{sidereal}}}. \quad (4)$$

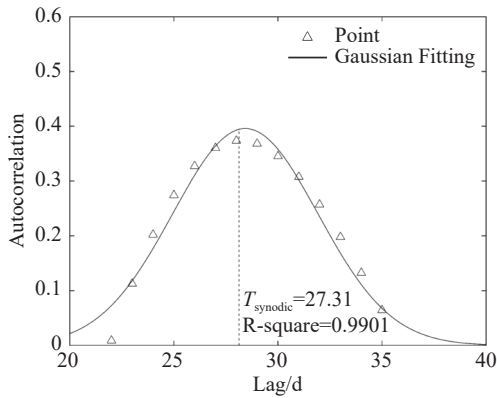


图7 2022年50°S处的高斯拟合图

Fig. 7 Gaussian fit plot at 50°S for the year 2022

众所周知, 太阳的自转角速度与纬度密切相关. 传统的自转角速度测量使用多项式拟合, 速度随着纬度的增加而减小, 在赤道处达到最大. Chandra等^[17]提出了纬度正弦的平方关系, 即:

$$\omega(\phi) = A + B \sin^2 \phi, \quad (5)$$

其中变量 ϕ 表示太阳的纬度, A 表示太阳赤道的自转角速度, B 表示自转角速度纬向较差程度.

4 结果

4.1 自转轮廓曲线

本文基于SDO/AIA 9个波长图像, 采用通量调制法计算了每年不同纬度的自转角速度, 并利

用公式(5)得到了2011年至2023年共13 yr的拟合结果. 表1所示为1600 Å的每年拟合结果, 其中SE (Standard Error)为标准误差. SSN数据来源为比利时皇家天文台的布鲁塞尔世界数据中心SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations)^[34] (<https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>). 最后一行展示了年平均自转系数 A 和 B 的拟合结果及其SE. 2011—2023年平均自转轮廓系数的 A 值大致在14.01到14.84之间, B 值在-1.32到-3.24之间变化. 将2011—2023年各纬度带的自转周期取13 yr的平均值后计算平均自转角速度, 拟合得到13 yr的平均自转轮廓系数为 $A=14.33\pm0.07$, $B=-2.12\pm0.12$. 图8展示了2022年自转角速度随纬度变化的轮廓曲线, 横坐标代表纬度, 纵坐标是自转角速度, 其中带误差棒的黑色散点表示自转角速度, 黑色曲线是拟合的自转轮廓曲线. 由图可见, 自转角速度从赤道向极点减小. 使用相同的分析方法计算了其他的8个波段的自转轮廓系数, 如表2所示. 其中第2列是主要的发射离子, 第3列为距离光球层的高度与高度误差, 第4列与第5列分别给出了其平均自转轮廓系数 A 、 B 与误差. 距离光球层的高度均来自其他文献研究结果. 由于131 Å、94 Å尚未在文献中找到具体高度, 用横线代替. 图9展示了9个波段的平均自转轮廓曲线, 横坐标代表纬度, 纵轴是自转角速度. 由图可见, 9个波长的较差自转轮廓比较类似, 都是赤道附近自转角速度最大, 纬度越高自转角速度越小, 其中1700 Å和1600 Å波长的较差自转轮廓随纬度下降最快, 说明这两个波段的较差自转更强.

表1 不同年份拟合的 A 和 B 值及其误差
Table 1 Fitted A and B values and errors for different years

Year	$A \pm \text{SE} / [({}^\circ) \cdot \text{d}^{-1}]$	$B \pm \text{SE} / [({}^\circ) \cdot \text{d}^{-1}]$	SSN
2023	14.84±0.22	-2.57±0.41	125.5
2022	14.72±0.30	-3.24±0.55	83.2
2021	14.01±0.18	-1.53±0.33	29.6
2020	14.42±0.22	-3.12±0.40	8.8
2019	14.07±0.19	-2.80±0.35	3.6

表1 续
Table 1 Continued

Year	$A \pm SE / [(\circ) \cdot d^{-1}]$	$B \pm SE / [(\circ) \cdot d^{-1}]$	SSN
2018	14.57±0.55	-1.73±1.01	7.0
2017	14.31±0.36	-1.32±0.66	21.7
2016	14.21±0.18	-2.96±0.33	39.8
2015	14.47±0.17	-2.50±0.32	69.8
2014	14.76±0.30	-2.08±0.55	113.3
2013	14.04±0.21	-2.83±0.38	94.0
2012	14.63±0.26	-2.89±0.48	84.5
2011	14.76±0.24	-1.89±0.44	80.8
Ave	14.33±0.07	-2.12±0.12	—

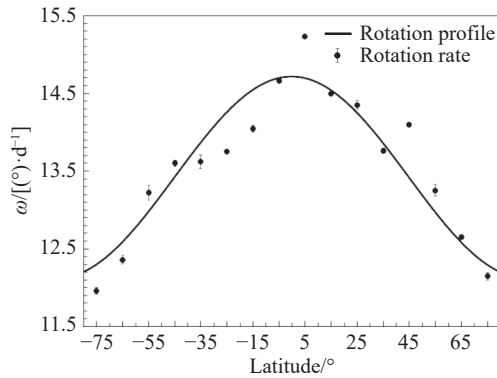


图 8 2022年的自转轮廓图

Fig. 8 The rotation profile for the year 2022

4.2 自转速度随高度变化

最近的一项研究中, Rao等^[40]使用了中国羲和号(Chinese H α Solar Explorer, CHASE)的多普勒图, 专注于 SiI (6560.58 Å)、H α (562.81 Å)和

FeI (6569.21 Å)这几个波长, 光谱分辨率为0.024 Å, 获取了太阳光球和色球不同层的自转轮廓曲线. 研究得出结论, 太阳的自转角速度从光球层到色球层呈变快趋势. Sharma等^[19]使用AIA的多波段数据研究了日冕在不同波长的旋转, 包括94 Å、131 Å、171 Å、193 Å、211 Å和335 Å. 本文的工作使用了SDO/AIA 1700 Å、304 Å、1600 Å、171 Å、211 Å、193 Å、335 Å的数据, 表2给出了2011—2013年的各波长通道的平均自转轮廓系数. 将各波长通道得到的自转轮廓系数A、B分别与所对应的高度进行相关分析. 图10和图11分别展示了自转轮廓系数A和B与高度的变化关系, 不同形状的点代表不同的波长通道, 横轴代表的是距离光球层的高度(来自不同的文献), 单位为km, 纵轴为系数A值, 代表太阳赤道处自转角速度. 红色的线段代表误差棒, 纵向的为纵轴的误差, 横向为横轴的误差. 从图像中变换趋势来看, 随着高度的增加, 自转轮廓系数A和B大体上具有上升的趋势. 为了进一步研究自转角速度与高度的关系, 引入了皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient). Pearson相关系数是衡量两个连续变量之间线性相关程度的统计量, 包含 ρ 和 p 两个参数. 其中 ρ 的取值范围为-1到1, 值越大表明相关性越好. 值为1代表完全正相关, -1代表完全负相关, 值为0则无线性相关. p 值越小说明相关性越强, p 值小于0.05通常表示相关系数是显著的. 计算得到系数A和B与高度之间的Pearson相关性系数分别为0.828 ($p=0.021$)、0.728 ($p=0.064$). 由此可见太阳赤道处的自转角速度与太阳层高度之间的变化是具有正相关性的, 较差自转程度则随着高度增加而减弱.

表 2 AIA不同波长的太阳自转参数
Table 2 Solar rotation parameters at different AIA wavelengths

Wavelength/Å	Ion ^[30, 35]	Height±Error/km	$A \pm SE / [(\circ) \cdot d^{-1}]$	$B \pm SE / [(\circ) \cdot d^{-1}]$
1700	Continuum	360±162.5 ^[36]	14.304±0.170	-2.754±0.32
1600	CIV	430±92.5 ^[36]	14.331±0.08	-2.122±0.14
335	FeXVI	15200±2300 ^[37]	14.458±0.07	-1.183±0.140
304	HeII	2820±400 ^[38]	14.321±0.05	-1.464±0.09

表2 续
Table 2 Continued

Wavelength/Å	Ion ^[30, 35]	Height±Error/km	A±SE/[$(^{\circ})\cdot d^{-1}$]	B±SE/[$(^{\circ})\cdot d^{-1}$]
171	FeIX	5100±1900 ^[39]	14.310±0.14	-1.399±0.26
211	FeXIV	6100±1900 ^[39]	14.391±0.03	-1.267±0.06
193	FeXII	6700±2000 ^[39]	14.440±0.06	-1.388±0.12
131	FeVIII	-	14.367±0.09	-1.564±0.17
94	FeXVIII	-	14.389±0.08	-1.415±0.16

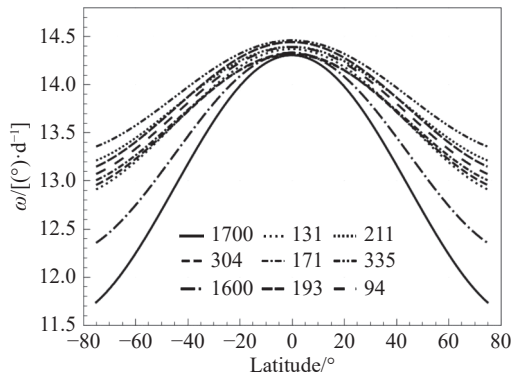


图 9 AIA 9 个波长通道的平均较差自转轮廓

Fig. 9 Average differential rotation profile across nine AIA wavelength channels

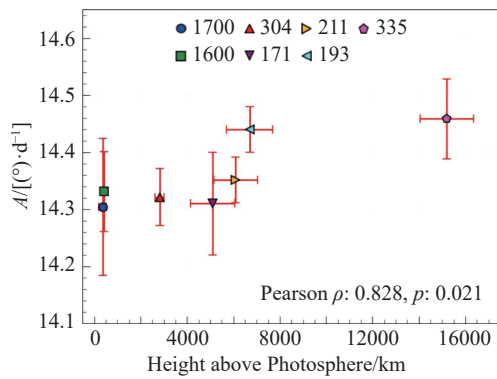


图 10 自转轮廓系数A随高度变化

Fig. 10 The rotation profile coefficient A varies with height

4.3 太阳自转与太阳活动周之间的关系

为了探索太阳自转角速度与太阳活动周之间的关系, 通常的做法是使用太阳黑子数来表示太阳活动周^[19]. 我们将2011年至2023年每年赤道的平

均自转角速度A以及较差自转程度B与年平均太阳黑子数进行了比较, 结果如表1所示. 这段时间可以划分为2011年至2018年(太阳活动第24周期的中后段)和2019年至2023年(太阳活动第25周期的开始阶段).

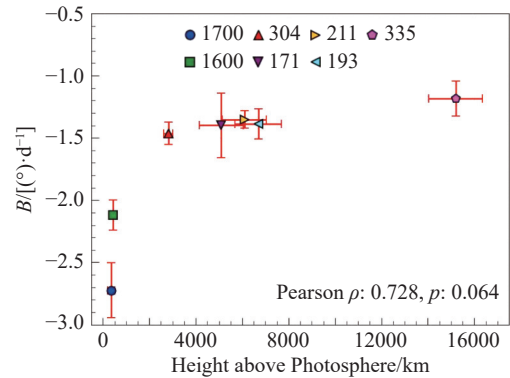


图 11 自转轮廓系数B随高度变化

Fig. 11 The rotation profile coefficient B varies with height

图12表示不同波长每年的自转轮廓系数A随着年份变化, 左轴表示的是自转角速度, 右轴是年平均太阳黑子数, 横轴是年份. 图13则是不同波长每年的轮廓系数B随年份变化的曲线, 两图中的红色曲线都表示年平均太阳黑子数随年份的变化趋势. 为了更加直观地得到不同波长的轮廓系数与太阳黑子数的关系, 将每个波长的轮廓系数与太阳黑子数之间进行相关性分析. 由图可见, 轮廓系数与年平均太阳黑子数并非线性关系, 故此次采用衡量非线性相关程度的斯皮尔曼系数(Spearman Correlation Coefficient). 斯皮尔曼系数也包含相关系数ρ和p值. ρ值的范围从-1到1. 值

越接近1或-1,表示两个变量之间的单调关系越强,即一个变量增加时另一个变量也倾向于增加.负值表示负相关,即一个变量增加时另一个变量倾向于减少.如果 p 值小于0.05,则认为相关系数在统计上是显著的.计算得到斯皮尔曼相关系数结果如表3所示, ρ 普遍偏小, p 值较大,表明自转轮廓系数与太阳黑子数之间没有明显的相关性.由此,可推断出9个波长对应的太阳自转与太阳活动周之间没有明显的相关性.

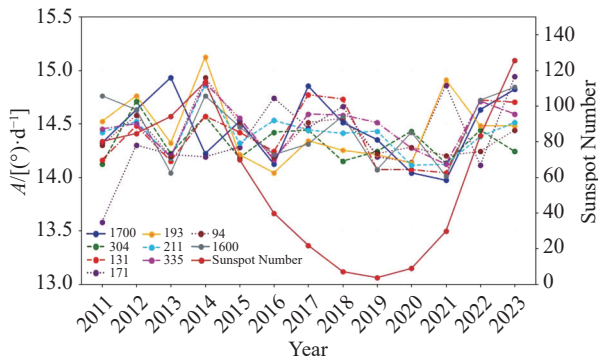


图 12 自转轮廓系数 A 与太阳黑子数的关系

Fig. 12 The relationship between the rotation profile coefficient A and sunspot numbers

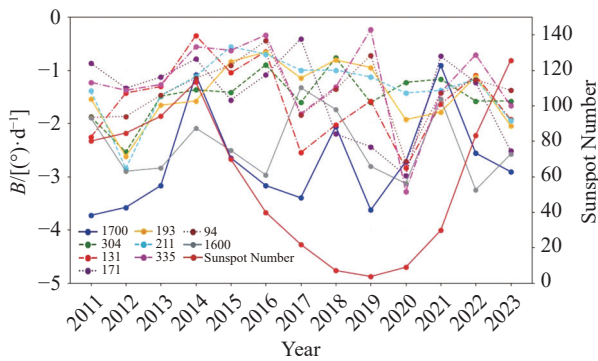


图 13 自转轮廓系数 B 与太阳黑子数的关系

Fig. 13 The relationship between the rotation profile coefficient B and sunspot numbers

5 总结与讨论

基于SDO/AIA 1700 Å、1600 Å、304 Å、171 Å、193 Å、211 Å、131 Å、335 Å、94 Å 9个波段的全日面图像数据,采用通量调制法研究

了2011年至2023年的太阳较差自转,得到了以下结论:

表 3 自转轮廓系数与年平均太阳黑子数的斯皮尔曼相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficient between rotation profile coefficient and annual mean sunspot numbers

Wavelength/Å	A		B	
	ρ	P	ρ	P
1700	0.385	0.194	0.049	0.873
304	0.236	0.437	-0.286	0.344
1600	0.545	0.054	-0.187	0.541
131	0.214	0.482	0.451	0.122
171	0.044	0.887	0.148	0.629
193	0.577	0.039	-0.478	0.098
211	0.341	0.255	-0.451	0.122
335	0.291	0.334	0.022	0.943
94	0.187	0.541	-0.066	0.831

(1) 获取了在各波段下的平均太阳较差自转轮廓.太阳在赤道的自转角速度最大,随着向两极移动,速度逐渐减慢.1700 Å、1600 Å紫外波段的太阳较差自转程度明显大于极紫外波段.

(2) 研究了SDO/AIA 1700 Å、304 Å、1600 Å、171 Å、211 Å、193 Å、335 Å 7个波段的太阳较差自转轮廓系数与距离光球层高度的关系,发现随着高度的增加,赤道处的自转角速度(A)变大,较差自转程度 $|B|$ 则有减小的趋势.Sharma等^[19]使用AIA 94 Å、131 Å、171 Å、193 Å、211 Å和335 Å数据研究日冕不同层次的自转周期,发现随高度(温度)的增加而减小,即自转角速度随高度增加而增大.Rao等^[40]通过中国羲和号(CHASE)的多普勒图获取的自转轮廓也表明随着光球到色球的高度增加,自转角速度在变快.Vats等^[15]的研究也表明较高的日冕比较低高度的日冕自转角速度更快.

(3) 探索了自转角速度与太阳活动周之间的关系.将平均赤道自转角速度(A)与国际SSN进行了相关性分析.同样对系数 B 与国际SSN的关系也

进行了相关性计算. 结果表明系数 A 以及系数 B 两者与SSN均没有相关性. Chandra等^[17]发现, 日冕赤道的自转速度(A)与每年太阳黑子数呈正相关, 而纬向较差程度(B)与年太阳黑子数呈负相关. 同样, Sharma等^[16]表明, 太阳过渡区全日面图像的平均自转角速度与太阳活动周之间存在正相关. Wu等^[24]也展示了平均自转角速度与太阳活动周之间变化的同步性. 但是Ruždjak等^[41]研究发现赤道自转角速度和太阳活动周之间存在负相关. 费宇等^[42]对1939年1月1日到2023年12月31日的日冕绿线辐射强度进行研究, 发现在第18–24活动周范围内, 日冕自转角速度呈现加快趋势. 目前自转角速度与太阳活动周之间的关系还尚无定论, 有待进一步研究.

致谢 感谢NASA、SDO/AIA科学团队提供的数据以及比利时皇家天文台布鲁塞尔WDC-SILSO提供的年度太阳黑子数.

参考文献

- [1] Babcock H W. *ApJ*, 1961, 133: 572
- [2] Howard R. *ARA&A*, 1984, 22: 55
- [3] Schroeter E H. *SoPh*, 1985, 100: 141
- [4] Tsiropoula G. *JASTP*, 2003, 65: 469
- [5] Georgieva K, Kirov B, Javaraiah J, et al. *P&SS*, 2005, 53: 197
- [6] Gilman P A. *ARA&A*, 1974, 12: 47
- [7] Balthasar H, Vazquez M, Woehl H. *A&A*, 1985, 155: 87
- [8] Arevalo M J, Gomez R, Vazquez M, et al. *A&A*, 1982, 111: 266
- [9] Glackin D L. *SoPh*, 1974, 36: 51
- [10] Adams W M, Tang F. *SoPh*, 1977, 55: 499
- [11] Belvedere G, Godoli G, Motta S, et al. *ApJ*, 1977, 214: L91
- [12] Berger P S, Simon M. *ApJ*, 1972, 171: 191
- [13] Livingston W C. *SoPh*, 1969, 9: 448
- [14] Beck J G. *SoPh*, 2000, 191: 47
- [15] Vats H O, Cecatto J R, Mehta M, et al. *ApJ*, 2001, 548: L87
- [16] Sharma J, Brajesh K, Malik A K, et al. *MNRAS*, 2021, 506: 4952
- [17] Chandra S, Vats H O, Iyer K N. *MNRAS*, 2009, 400: L34
- [18] Chandra S, Vats H O, Iyer K N. *MNRAS*, 2010, 407: 1108
- [19] Sharma J, Kumar B, Malik A K, et al. *MNRAS*, 2020, 492: 5391
- [20] Li K J, Xu J C, Xie J L, et al. *ApJ*, 2020, 905: L11
- [21] Oghrapishvili N B, Bagashvili S R, Maghradze D A, et al. *AdSpR*, 2018, 61: 3039
- [22] Wan M, Li K J. *SoPh*, 2022, 297: 126
- [23] Sharma J, Malik A K, Vats H O, et al. *MNRAS*, 2023, 521: 1079
- [24] Wu Q R, Zheng S, Zeng S G, et al. *ApJ*, 2023, 954: 20
- [25] Kharayat H, Singh J, Priyal M, et al. *ApJ*, 2024, 968: 53
- [26] Sharma J, Banerjee S K, Singh N K, et al. *SoPh*, 2024, 299: 90
- [27] Li K J, Shi X J, Xie J L, et al. *MNRAS*, 2013, 433: 521
- [28] Li K J, Feng W, Shi X J, et al. *SoPh*, 2014, 289: 759
- [29] Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. *SoPh*, 2012, 275: 3
- [30] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. *SoPh*, 2012, 275: 17
- [31] Simões P J A, Reid H A S, Milligan R O, et al. *ApJ*, 2019, 870: 114
- [32] Neckel H, Labs D. *SoPh*, 1994, 153: 91
- [33] Lefebvre S, Rozelot J P. *SoPh*, 2004, 219: 25
- [34] Clette F, Svalgaard L, Vaquero J M, et al. *SSRv*, 2014, 186: 35
- [35] Boerner P, Edwards C, Lemen J, et al. *SoPh*, 2012, 275: 41
- [36] Fossum A, Carlsson M. *ApJ*, 2005, 625: 556
- [37] Simon G W, Noyes R W. *SoPh*, 1972, 22: 450
- [38] Simon G W, Seagraves P H, Tousey R, et al. *SoPh*, 1974, 39: 121
- [39] Kwon R Y, Chae J, Zhang J. *ApJ*, 2010, 714: 130
- [40] Rao S, Li C, Ding M, et al. *NatAs*, 2024, 8: 1102
- [41] Ruždjak D, Brajša R, Sudar D, et al. *SoPh*, 2017, 292: 17
- [42] 费宇, 何瑞雪, 邓林华, 等. *天文学报*, 2025, 66: 15

Solar Differential Rotation Study Based on SDO/AIA Ultraviolet Images

ZENG Shu-guang^{1,2} JIN Han-le^{1,2} DENG Lin-hua³ WU Qian-rui⁴ ZENG Xiang-yun^{1,2}
ZHENG Sheng^{1,2} HUANG Yao^{1,2} LIU De-jian^{1,2}

(1 Center for Astronomy and Space Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(2 College of Mathematics and Physics, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(3 School of Mathematics and Computer Science, Yunnan Minzu University, Kunming 650504)

(4 South-Western Institute for Astronomy Research, Yunnan University, Kunming 650500)

ABSTRACT The differential rotation of the Sun is a key mechanism for converting polar magnetic fields into toroidal magnetic fields. We used the flux modulation method to study the differential rotation of the Sun based on the full-disk ultraviolet images at 1600 Å, etc. from the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) of the Solar Dynamics Observatory (SDO). First, the full-disk images were preprocessed and divided into different latitude regions. Then, after data processing, the flux time series of each latitude region were obtained. Finally, autocorrelation analysis was performed on the flux time series of each latitude region to obtain the rotation period and angular velocity of rotation at different latitudes. Research findings indicate that within the latitude range of 80°S to 80°N, the solar angular velocity of rotation varies as a function of latitude. Across different AIA wavelengths, the equatorial angular velocity of rotation increases with height, while the differential rotation degree decreases. The average angular velocity of rotation and differential rotation degree near the equator show no significant correlation with the solar activity cycle.

Key words Sun: rotation, Sun: activity, Sun: UV radiation, methods: data analysis, autocorrelation