



论文

太阳半径变化特征分析

冯雯^{①②*}, 李富羽^{③④}

① 昆明理工大学分析测试研究所, 昆明 650093;

② 南京大学现代天文与天体物理教育部重点实验室, 南京 210093;

③ 中国科学院云南天文台, 昆明 650011;

④ 国家天文台, 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012

*联系人, E-mail: fengwen69@sina.cn

收稿日期: 2015-06-12; 接受日期: 2015-07-14; 网络出版日期: 2015-07-30

现代天文与天体物理教育部重点实验室开放基金课题、国家自然科学基金(批准号: 11273057, 11221063)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB957801, 2011CB811406)

摘要 本文对土耳其国立 Tubitak 天文台观测的 2001 年 3 月到 2007 年 8 月期间的每月平均太阳半径值进行集合经验模式分解分析来研究太阳半径的变化特征. 太阳半径在年际尺度上的短期变化可能和太阳强磁活动没有关联, 在活动周尺度上的变化和强磁活动存在非常强的反相关关系. 太阳半径在活动周的下降期的年变化率为 $0.0427''/\text{年}$, 在活动周尺度上的相对变化估计为 0.036% , 变化幅度可达 $0.3544''$.

关键词 太阳半径, 太阳活动, 太阳周

PACS: 96.60.Bn, 96.60.Q, 96.60.qd

doi: 10.1360/SSPMA2015-00302

1 引言

我国是最先测量太阳直径的国家^[1,2].《周髀算经》中描述了古人测量太阳直径的方法:“即取竹空径一寸. 长八尺. 捕影而视之. 空正掩日. 而日应空之孔. 由此观之. 率八十寸. 而得径一寸. 故以句为首. 以髀为股. 从髀至日下六万里. 而髀无影. 从此以上至日. 则八万里. 以率率之. 八十里得径一里. 十万里得径千二百五十里. 故曰. 日晷径”^[2]. 其测量结果为: 太阳直径(D)是日地距离(L)的八十分之一, 这个值接近当前的测量结果: $D=L/109$. 太阳半径一般指从太阳球心到太阳大气光球层外边界的长度^[1].

对太阳半径的测量主要有以下几种方法: 子午圈测量方法、日食和水星凌日测量方法、望远镜漂移扫描测量方法、等高方法、以及卫星角距离测量方法等^[1]. 目前 IAU 公布的标准太阳半径值为 $959.63''$. 受太阳半径测量数据的精度和观测序列长度的影响, 对太阳半径的长期变化规律与特征, 目前还没有一个较好的把握. 例如, 一些学者认为太阳半径基本不变^[3,4]或在有间断观测数据的数十年尺度上一直在减小^[5,6], 还有一些学者则认为太阳半径在太阳周尺度上存在变化: 和太阳活动周同相位^[7,8]、亦或反相位^[9-13]. 这就是说, 对太阳半径的长期变化的认识, 还没有一个

引用格式: 冯雯, 李富羽. 太阳半径变化特征分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 099602

Feng W, Li F Y. Solar radius varying on the scale of a solar cycle (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 099602, doi: 10.1360/SSPMA2015-00302

普遍接受的定论, 因此对太阳半径的精确观测与研究是必要的. 土耳其国立 Tubitak 天文台对太阳半径进行了每日地面 CCD 漂移扫描常规观测. 文献[14–16]对该观测原始数据进行了改正、频谱分析确定周期、以及平滑分析确定长期变化趋势. 平滑分析给出的长期变化趋势往往仍包含短期变化.

经验模态分解是一种能提取长期变化趋势的新方法, 它逐级进行平稳化处理, 把不同周期的波动从原信号中分离出来, 并且该波动是平稳的, 最后得到的是趋势分量^[17]. 经验模态分解还能提取出被强信号或噪声掩盖的弱信号. 集合经验模式分解方法能克服经验模态分解方法里混频的缺点^[18]. 本文将用集合经验模式分解方法对该数据进行分析, 研究太阳半径在不同时间尺度上的变化.

2 太阳半径的太阳活动周变化

2.1 数据

太阳半径的 3 个最密集观测时间序列是: (1) 法国 Calern 天文台的观测, 从 1975 年开始, 持续到 2006 年, 横跨了近 3 个太阳周, 但只有约 1500 多天的数据(平均约 7.5 天一个观测数据); (2) 巴西 Rio de Janeiro 天文台的观测, 从 1998 年到 2008 年, 也只有约 1100 天的观测(平均约 3.3 天一个观测数据); (3) 土耳其国立 Tubitak 天文台给出了 2000 年 3 月到 2007 年 8 月的观测, 有 1500 多天的观测(平均约 1.8 天一个观测数据). 因此土耳其的观测最密集, 且数据分布比前两者要均匀(前两个序列有时会在一段较长时间范围内没观测). 土耳其的观测数据进行了大气扰动的改正, 观测涵盖了 23 周的下降期, 最适合用来研究在太阳活动周尺度上的变化.

文献[16]给出了太阳半径在 2001 年 3 月到 2007 年 8 月期间的每月平均值. 我们对该期间的冬季所缺的数据由三次样条插值方法进行了插值, 得到连续的数据, 如图 1 所示. 同时期的黑子数表征太阳活动周将用来与半径数据进行比对, 也在图 1 中给出了.

对太阳半径数进行线性拟合, 得到 t 时刻(日历天为单位)的太阳半径(角秒单位)为 $r=875.5775+0.0418t$, 拟合线在图 1 中给出, 它与对应实际半径值的相关系数为 0.8032, 在 99.99% 水平上有意义. 因此得到太阳半径的年变化率, 为 $0.0418''/\text{年}$. 此期间的太阳半径的平均值统计计算为 $959.2353''\pm 0.0981''$.

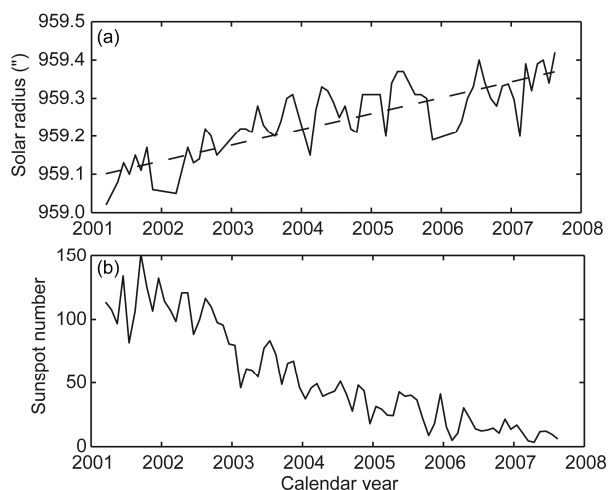


图 1 2001 年 3 月到 2007 年 8 月期间月平均太阳半径值((a), 实线)和黑子数((b)). 虚线是太阳半径的线性拟合

Figure 1 (a) monthly mean value of solar radius during March 2001 to August 2007 (the solid line) and its linear fitting (the dashed line); (b) monthly mean sunspot number at the same interval as the above.

2.2 集合经验模式分解分析

我们对太阳半径和黑子数这两个时间序列进行了集合经验模式分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition)分析, 得到 5 个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个趋势项, 如图 2 和 3

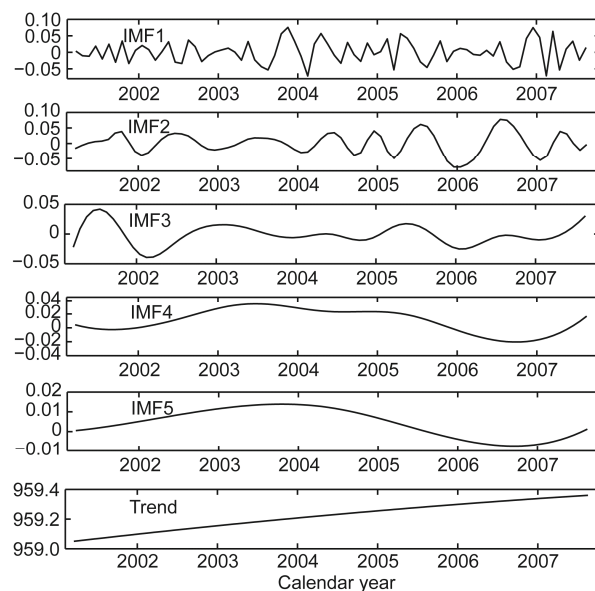


图 2 太阳半径的 5 个本征模态函数和趋势项成分(底部)

Figure 2 Intrinsic Mode Function (IMF)1 to 5 of solar radius and its trend component (the bottom panel).

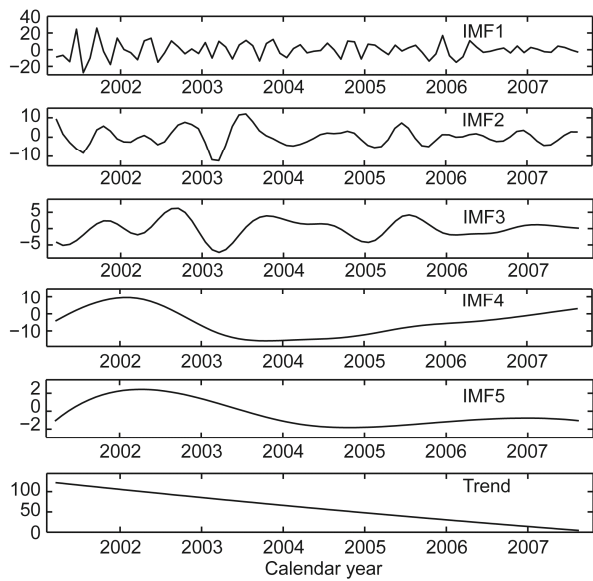


图 3 黑子数的 5 个本征模态函数和趋势项成分(底图)
Figure 3 Intrinsic Mode Function (IMF)1 to 5 of sunspot number and its trend component (the bottom panel).

所示. 接下来将对这些成分进行分析.

2.3 太阳半径短尺度变化

数据长度为 6 年半, 因此从图上看, 只有前 3 个本征模态函数可能存在周期. 对前 3 个本征模态函数进行小波分析, 得到总功率谱, 如图 4–6 所示. 表 1

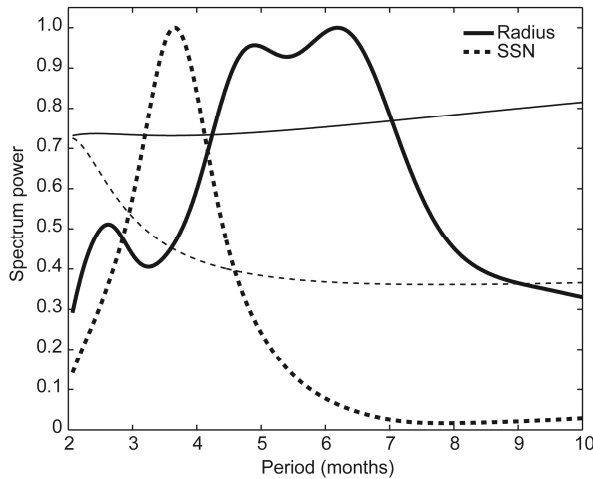


图 4 太阳半径(粗线)和黑子数(细线)第一个本征模态函数的功率谱(实线)及其对应的 95% 置信水平线(虚线)
Figure 4 Spectrum powers of the first IMF of both solar radius (the thick solid line) and sunspot number (the thin solid line). The thick and thin dashed lines are their corresponding 95% confidence lines.

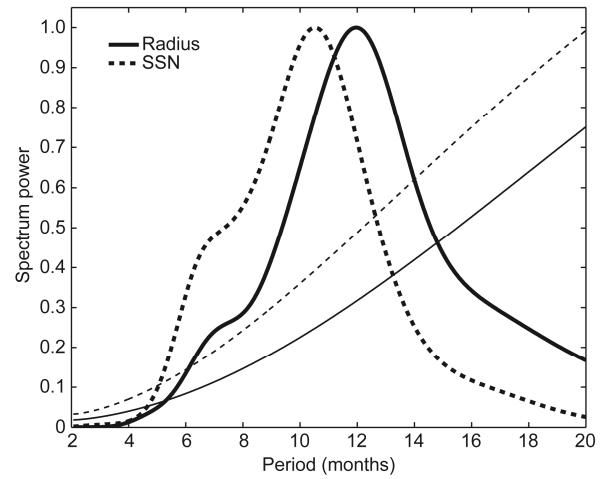


图 5 同图 4, 但对应于第二个本征模态函数
Figure 5 The same as Figure 4, but for the second IMF.

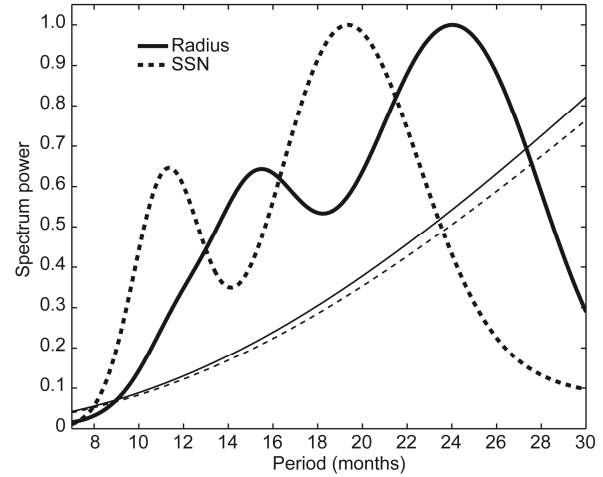


图 6 同图 4, 但对应于第三个本征模态函数
Figure 6 The same as Figure 4, but for the third IMF.

表 1 本征模态函数的周期(单位: 月)

Table 1 Periods of IMF 1 to 3 in months

	IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF1+IMF2+IMF3
半径	4.9, 6.2	12.0	15.5, 24.0	12.2
黑子数	3.7	10.5	11.3, 19.3	3.6, 11.0

给出了在 95% 置信水平有意义的周期.

太阳半径的这三个 IMF, 对应为约半年、一年和两年的周期成分, 黑子数并不存在这些周期. 由表 1 知, 两个时间序列的周期并不相同, 虽然彼此很接近. 我们计算了太阳半径和黑子数的 IMF 1-3 成分的相关系数, 依次为 0.0843, 0.0827, -0.0584, 全没有统计意

义,彼此并不关联. 因此统计上,太阳半径的短时标(年际)变化与黑子(强磁场)活动没有关联. 我们将这三个年际变化成分进行了合并,如图 7 所示. 我们对半径和黑子数的短时标年际变化成分进行了周期分析,总功率谱如图 8 所示,周期在表 1 中给出. 太阳半径存在年变化的信号,但黑子数的年际变化的周期约 11 个月,短于半径的周期. 半径和黑子数的短时标年际变化成分的相关系数为 0.1256,小于 90%置信水平值(0.1881),表明二者间存在统计上无意义的微弱的正相关关系.

2.4 太阳半径在太阳活动周尺度上的变化

半径和黑子数余下的 IMF 成分 IMF 5 和 6 的相关系数依次为 -0.6185 , -0.2103 , 趋势项间的相关系数为 -0.9993 , 全在 95%置信水平上有统计意义. 我们将半径和黑子数的 IMF5、6 和趋势项成分进行了合并,结果如图 7 所示. 由合成成分统计计算太阳半径的平均值为 $959.2343'' \pm 0.0840''$. 23 太阳活动周的极大期为 2000 年 4 月(群黑子数的极大期为 2001 年 11 月),极小期为 2008 年 11 月,我们所用数据的时间段基本上涵盖 23 周的下降期,因此合成成分主要反

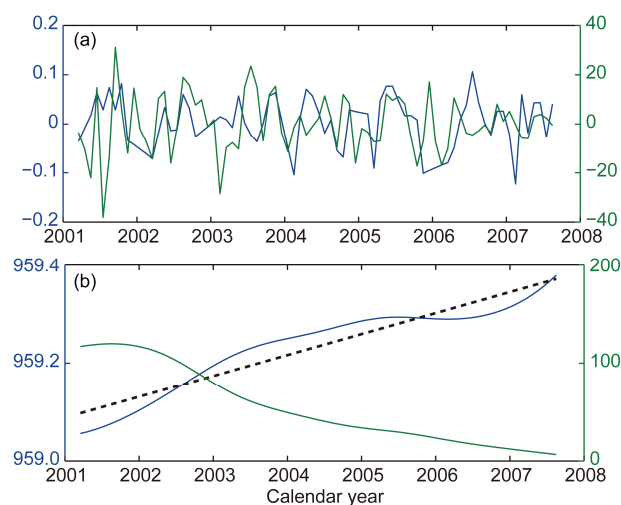


图 7 (网络版彩图)太阳半径(蓝线,左边坐标)和黑子数(绿线,右坐标)前三个本征模态函数的合成成分(a)以及后两个本征模态函数加上趋势项的合成成分(b). 黑虚线是太阳半径第二个合成成分的线性拟合

Figure 7 (Color online) (a) the first three IMFs' composition of solar radius (the blue line, and the left scale) and that of sunspot number (the green line, and the right scale); (b) the same as the above, but for the last two IMFs plus the trend. The black dashed line is the linear fitting to the blue line.

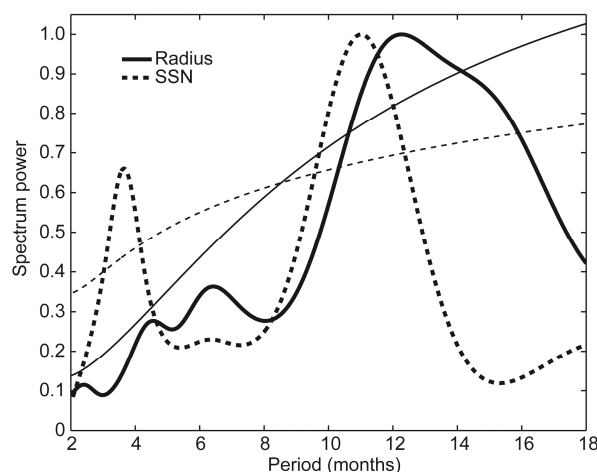


图 8 同图 4, 但对应于前三个本征模态函数的合成成分
Figure 8 The same as Figure 4, but for the first three IMFs' composition.

映活动周尺度上活动周下降期的变化. 合成成分间的相关系数为 -0.9831 , 在 99.99%水平上有统计意义, 表明二者间存在很强的反相关关系. 因此经过模式分解后, 太阳半径的长时间尺度变化就非常清楚地显现出来: 和活动周反相位.

我们对太阳半径合成成分进行了线性回归, 得到 t 时刻的太阳半径为 $r = 873.6415 + 0.0427t$. 回归线在图 7 中给出, 它与对应实际半径值的相关系数为 0.9484, 在 99.99%水平上有意义. 因此太阳半径的年变化率为 $0.0427''/\text{年}$, 比上面由原始数据直接给出的年变化率略大, 波动成分对年变化的估计略有影响. 23 周的下降长度为 8.3 年, 由此估计出太阳半径在一个活动周内的变化幅度为: $8.3 \times 0.0427 \approx 0.35$ (角秒), 变化百分比为 0.036%, 比太阳常数的太阳活动周变化还小.

3 结论与讨论

Tubitak 天文台对太阳半径进行了常规观测, 提供了太阳半径在 2001 年 3 月到 2007 年 8 月期间(基本涵盖 23 周下降期)的月平均值. 本研究对该数据进行集合经验模式分解分析, 得到 5 个本征模态函数和趋势项. 通过对前 3 个本征模态函数的小波周期分析, 发现太阳半径存在年变化信号, 但同时期的黑子数对应周期要小. 同时二者对应的本征模态函数统计上不相关, 因此推断: 太阳半径在年际尺度上的短期变化可能和太阳强磁活动没有关联. 太阳半径的后 2

个本征模态函数和趋势项, 其周期可以和数据长度比拟(或更长, 即无周期), 因此被定义为长期变化成分, 与黑子数对应的分解成分呈反相关关系. 太阳活动和黑子数的后 3 个分解成分的合成, 即为活动周尺度上的变化成分, 呈现很强的反相关关系, 非常清楚地表明: 太阳半径在太阳活动周尺度上的变化和太阳活动周反相位. 由这个合成成分得到太阳半径的平均值为 $959.2343'' \pm 0.0820''$, 与由原始数据得到的太阳半径的平均值 $959.2353'' \pm 0.0981''$ 非常接近, 但方差要明显的小, 表明对波动成分的剥离是恰当的. 半径的测量结果虽然和 IAU 公布值存在较大差别, 但和文献[19]给出的值 $959.20'' \pm 0.02''$, 文献[20]给出的值 $959.19'' \pm 0.03''$, 以及 Emilio 等人^[21]用 MDI 测得的太阳半径值 $959.28'' \pm 0.15''$ 很接近.

由原始太阳半径数据得到半径的年变化率为 $0.0418''/\text{年}$, 去除波动成分的影响后估计为 $0.0427''/\text{年}$, 并因此估计太阳半径在一个活动周内的变化幅度为 $0.35''$, 变化百分比为 0.036% . 变化幅度显著比半径平均值的方差大很多, 约为 4 倍. 因此本研究首次从变化的幅度上阐明: 太阳半径与太阳活动周反相位的结论是可信的. 目前对太阳半径在太阳活动周尺度上变化的解释是^[1]: 太阳强磁场从太阳内部浮现出太阳表面后, 太阳内部由于磁压的减小而收缩, 因此太阳半径和太阳活动周反相位.

本研究用三次样条插值方法对冬季所缺数据进行了插值, 该方法使得数据序列在插值处曲线光滑些. 不同方法插值对模式分解的高频 IMF 成分有很小的影响, 对低频 IMF 成分影响非常微小. 而本研究主要探讨太阳半径的长时间尺度变化, 不同的插值方法对本研究结果的影响是非常小的.

太阳总辐射(TSI)的太阳周变化约为 0.1% ^[22]. 太阳光球表面的发射率(a)为: $a = 4\pi A^2 (TSI)/(4\pi R^2)$, 其中 A 为日地平均距离. 由于 TSI 的观测值已经作了日

地距离的改正, 因此上式中 A 为不变量. $\Delta a/a = -2 \times \Delta R/R + \Delta(TSI)/(TSI) \approx 0.172\%$. 因此, 太阳表面的发射率具有更大的太阳周变化率, 且半径和总辐射这两个因素的变化对发射率的贡献是相当的. 太阳总辐射的变化也是与太阳磁活动相关联^[22], 太阳磁活动的太阳周变化^[23]导致太阳半径和太阳总辐射的变化, 三者间的变化图像是: 磁场浮出太阳表面, 内部压强减小, 半径收缩, 浮现磁场的部分能量加热大气, 引起总辐射增强, 导致发射率增强, 半径的收缩进一步增强发射率.

太阳半径观测的随机误差蕴含在短期变化的合成成分里, 但仍能检测到年变化的信号. 年变化的周期可能的产生原因有以下几种. (1) 观测(气候)环境(条件)等年度变化. 受其影响, 该数据往往没有冬季几个月的数据. (2) 太阳是个扁球, 对日观测的日面年度变化使得扁度在观测数据中可能呈现出来. 扁度变化的实测值 1.108×10^{-4} ^[24]. 半径原始数的方差与平均半径的比为 $0.0981''/959.2353'' \approx 1.023 \times 10^{-4}$, 与扁度的变化相当, 因此半径的年尺度变化可能反映的是扁度的变化. 最近 Rozelot 和 Damiani^[25]给出的扁度为 10 到 15 mas, 仅为方差的 1/8 左右, 因而不太可能由扁度引起. (3) 太阳磁活动的年周期^[21]. 到底是哪种原因还待深入探讨.

本研究利用的是 Tubitak 天文台的 23 周下降期数据来分析半径的变化特征. 该天文台在 2007 年后未见有数据发表. 太阳周的变化一般由极大极小时的观测值确定, 因此本研究确定的半径的太阳周变化是可信的. 由于太阳周的上升期比下降期一般要短, 因此上升期的年变化比下降期的值要略大. 研究表明太阳活动周上升相的增长率可以用来预报太阳峰年的活动强度^[26], 太阳半径的活动周变化或许将为太阳活动预报提供新的途径, 这个问题将来值得探讨.

致谢 感谢两位审稿专家给出的有益的审稿意见, 感谢李可军研究员对本研究的建议和意见.

参考文献

- 1 Qu Z N, Li K J. Progress in the measurement and study of solar radius (in Chinese). Prog Astron, 2013, 31: 253–266 [屈智宁, 李可军. 太阳半径测量与研究进展. 天文学进展, 2013, 31: 253–266]
- 2 周髀算经. 上海图书馆藏宋代嘉定六年本影印. 北京: 文物出版社, 1980. 32

- 3 Bush R I, Emilio M, Kuhn J R. On the constancy of the solar radius. III. *Astrophys J*, 2010, 716: 1381–1385
- 4 Wittmann A D. Visual and photoelectric measurements of the solar diameter (1972–2002): Methods and results. *Astron Nachr*, 2003, 324: 378–380
- 5 Dunham D W, Sofia S, Fiala A D, et al. Observations of a probable change in the solar radius between 1715 and 1979. *Science*, 1980, 210: 1243–1245
- 6 Dziembowski W A, Goode P R, Schou J. Does the sun shrink with increasing magnetic activity? *Astrophys J*, 2001, 553: 897–904
- 7 Qu Z N, Xie J L. Long-term periodicity variations of the solar radius. *Astrophys J*, 2013, 762: 23
- 8 Egidi A, Caccin B, Sofia S, et al. High-precision measurements of the solar diameter and oblateness by the solar disk sextant (SDS) experiment. *Sol Phys*, 2006, 235: 407–418
- 9 Delmas C, Laclare F. Short vs long time series: Example of the solar diameter. *Sol Phys*, 2002, 209: 391–396
- 10 Noel F. Solar cycle dependence of the apparent radius of the Sun. *Astron Astrophys*, 2004, 413: 725–732
- 11 Kholikov S, Hill F. Acoustic radius measurements from MDI and GONG. *Sol Phys*, 2008, 251: 157–161
- 12 Qu Z N, Feng W, Liang H F. Periodicity of the solar radius revisited by using empirical mode decomposition and the Lomb-Scargle method. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 879–888
- 13 Laclare F, Delmas C, Coin J P, et al. Measurements and variations of the solar diameter. *Sol Phys*, 1996, 166: 211–229
- 14 Kilic H, Golbasi O. Intermediate-term variations in solar radius during solar cycle 23. *Astron Nachr*, 2009, 330: 351–357
- 15 Kilic H, Golbasi O. On short-term periodicity of the solar radius measurements. *Sol Phys*, 2011, 270: 437–446
- 16 Kilic H, Golbasi O. Comparison of long-term trend of solar radius with sunspot activity and flare index. *Astrophys Space Sci*, 2011, 334: 75–81
- 17 Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc A*, 1998, 454: 903–995
- 18 Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method. *Adv Ada Data Anal*, 2009, 1: 1–41
- 19 Jilinski E G, Puliaev S, Penna J L, et al. Solar diameter observations at Observatório Nacional in 1997–1998. *Astron Astrophys Suppl*, 1999, 135: 227–229
- 20 Puliaev S, Penna J L, Jilinski E G, et al. Solar diameter observations at Observatório Nacional in 1998–1999. *Astron Astrophys Suppl*, 2000, 143: 265–267
- 21 Emilio M, Kuhn J R, Bush R I. One solar cycle of solar astrometry with MDI/SOHO. *IAU Symposium*, 2010, 264: 21–32
- 22 Li K J, Feng W, Xu J C, et al. Why is the solar constant not a constant? *Astrophys J*, 2012, 747: 135
- 23 Zhao M Y, Chen J Q, Liu Y, et al. Statistical analysis of sunspot groups and flares for solar maximum and minimum (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 109–120 [赵明宇, 陈军权, 刘煜, 等. 太阳活动峰年和谷年期间黑子群与耀斑的统计分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 109–120]
- 24 Noel F. The sun's surface and subsurface: Investigating shape. *Lecture Notes Phys*, 2003, 599: 181–195
- 25 Rozelot J P, Damiani C. Rights and wrongs of the temporal solar radius variability. *Eur Phys J*, 2012, 37: 709–743
- 26 Du Z L, Wang H N. Predicting the solar maximum with the rising rate. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 365–370

Solar radius varying on the scale of a solar cycle

FENG Wen^{1,2*} & LI FuYu^{3,4}

¹ *Research Center of Analysis and Measurement, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;*

² *Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210093, China;*

³ *Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China;*

⁴ *Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*

Monthly mean values of solar radius measured at the Tubitak National Observatory, Turkey during the interval of March 2001 to August 2007 have been utilized to investigate variation of solar radius at the scale of solar cycle through the Ensemble Empirical Mode Decomposition analysis. Variation of solar radius at the short-term scale of years is found to have little statistical relation with the strong magnetic field activity of the Sun. But at the long-term scale of a solar cycle, variation of solar radius statistically displays a strong negative correlation with sunspot number. Variation of solar radius is about 0.0427"/year, averaged over the descending period of a solar cycle, and reaches about 0.3544" within a solar cycle, namely about 0.036% in the amplitude variation of solar radius within a solar cycle.

solar radius, solar activity, solar cycles

PACS: 96.60.Bn, 96.60.Q, 96.60.qd

doi: 10.1360/SSPMA2015-00302