

太阳活动极大和极小期太阳磁场周期变化研究*

叶 妮 祝凤荣 周雪梅 贾焕玉[†]

(西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

摘要 利用 Wilcox 天文台 1975 年到 2010 年间的太阳磁场数据, 分析了太阳平均磁场在太阳活动极大和极小时期的短时周期性. 结果显示太阳磁场主要具有 9 d、13.5 d、27 d 左右的周期. 在太阳活动极大时期, 27 d 左右周期最为显著, 而在太阳活动极小时期最显著的周期为 13.5 d 左右 (1984~1986 年间的太阳活动极小时期除外). 这些结果说明太阳的活动区域在活动极大和极小时期具有明显不同的分布.

关键词 太阳: 活动性, 太阳: 磁场

中图分类号: P 182; **文献标识码:** A

1 引言

太阳磁场是指分布于太阳光球、色球和日冕低层中的磁场. 若把太阳当作 1 颗恒星而观察它整个可见半球的总磁场 (实际上是整个半球的平均磁场), 则可发现随着太阳自转, 其平均磁场的极性会发生变化^[1]. 太阳磁场存在周期性变化, 比如已经很清楚地观测到的 11 yr 的周期.

太阳是距离地球最近的恒星, 生活在地球上的人类与其关系极为密切. 太阳活动对地球有着巨大影响, 而太阳的很多活动现象, 如太阳黑子、耀斑、日珥等都直接受磁场支配, 因此太阳磁场的周期性变化研究具有重要意义. 特别是太阳磁场短时 (几天到几十天) 周期的研究可以为预报天气、气候、水文、地震等提供重要基础.

对于太阳磁场的短时周期的研究, 前人做了大量工作. 在太阳风的作用下, 太阳磁场弥漫至整个行星际空间, 形成行星际磁场. 利用行星际磁场极性 (指向或背离太阳) 的观测结果, Svalgaard 等^[2] 观察到在太阳黑子活动第 16 到 20 周内太阳磁场具有 27.0 d 的周期. Neugebauer 等^[3] 使用超过 3 个太阳活动周的太阳风及行星际磁场径向分量数据, 得到太阳会合自转周期为 27.03 d. 随后, Henney 等^[4] 绘制出太阳活动表层分布图, 并对光球磁场作了光谱分析, 发现 27.03 d 的周期信号起源于北纬约 18° 的活动区. 此外, 利用 1968~2001 年的太阳平均磁场数据, Hameed 等^[5] 得出太阳磁场赤道旋转的主会合周期为 26.929 d.

2011-08-02 收到原稿, 2011-08-25 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11175147) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (SWJTU11CX076) 资助

[†] hyjia@swjtu.cn

除了 27 d 左右的太阳磁场周期外, 13.5 d 左右的周期也备受研究者关注. Donnelly 等^[6] 分析了 1979~1984 年间的紫外线辐射通量数据, 得出 13.5 d 的周期信号可能源于太阳上经度相差大约为 180° 的两个活动区域. Pap 等^[7] 也在太阳总辐射量和活动黑子群投影面积数据中发现非常突出的 13.5 d 周期信号, 进一步证实了 Donnelly 等^[6] 的结果. Bobova 等^[8] 研究太阳磁场和地磁场的 7~50 d 的周期变化时发现 13.5 d 的周期在赤道区域很显著, 他们也认为 13.5 d 的周期源于太阳活动区的空间分布^[8]. Mursula 等人对第 20、21、22 太阳活动周中的太阳色球、近地太阳风、行星际磁场及地磁活动的 13.5 d 周期进行了详细分析后指出: 在太阳色球层中, 13.5 d 周期源于太阳经度相差约为 180° 的两个活动区, 而在太阳风和地磁活动中, 13.5 d 周期源于在每个自转周期内出现的两高速粒子流^[9]. Das 等人将太阳平均磁场在太阳活动极小年、太阳活动极大年、太阳活动极小年前后、太阳活动极大年前后分别进行了分析, 在所有研究的时段中均发现有 13.5 d 的周期信号存在^[10]. Boberg 等^[11] 利用小波变换分析方法, 对 WSO 和 SOHO/MDO 的太阳平均磁场观测数据分别进行了分析, 在两组数据中都清楚地观察到了 13.5 d 的周期信号.

Bobova 等^[8] 以及 Prabhakaran 等^[12] 在研究中还发现了 9 d 的太阳活动周期. Temmer 等^[13] 在研究了冕洞面积、太阳风和地磁 Dst 指数后指出, 9 d 的周期可能来源于经度相差 120° 的 3 个冕洞. 不久, Lei 等^[14] 进一步证实了上述结论.

总之关于太阳磁场, 已发现 9 d、13.5 d、27 d 左右等短时周期变化, 但太阳活动极大和极小期的太阳磁场周期性对比分析目前还少见报道, 而这种对比分析对揭示太阳磁场结构和了解太阳活动有重要意义. 为此本文利用 1975 年到 2010 年的太阳平均磁场数据, 分别对太阳活动极大和极小期的太阳磁场周期进行分析和对比研究, 期望寻找到太阳活动极大和极小期太阳磁场周期性的差异.

2 数据和数据处理方法

太阳平均磁场 (Solar Mean Magnetic Field, SMMF) 是把太阳当成 1 颗恒星, 测得的可见太阳半球内日面各处混合而成的磁场. Wilcox 天文台于 1975 年开始在斯坦福大学内每天多次用磁像仪观测, 将所得的数据取加权平均, 得到太阳平均磁场, 测量误差小于 0.05 G ^[15]. 我们收集整理了 Wilcox 天文台测量的 1975 年 5 月到 2010 年 1 月共 417 个月的太阳平均磁场数据 (数据来源于网站 <http://wso.stanford.edu/>, 1 d 一个数据值). 如图 1 所示, 太阳平均磁场随时间有明显的 11 yr 变化周期, SMMF 数值在太阳活动剧烈时期大, 在太阳活动平静时期小. 实际上 SMMF 数值可以很好地反映太阳的活动情况.

天文观测的自身特性导致了数据在时域上常常是不均匀分布并且包含了大量的随机噪声^[16]. 对于这样时域上不均匀采样的数据使用传统的傅立叶变换法进行周期分析会产生虚假信号. Lomb^[17] 和 Scargle^[18] 发展和完善的 Lomb-Scargle 傅立叶变换法适用于时域不均匀序列信号的周期提取. Lomb-Scargle 傅立叶变法分析周期的计算公式在文献^[19] 中有详细描述.

由 Lomb-Scargle 傅立叶变换法得到的归一化功率谱可以确定时间序列信号中的周期

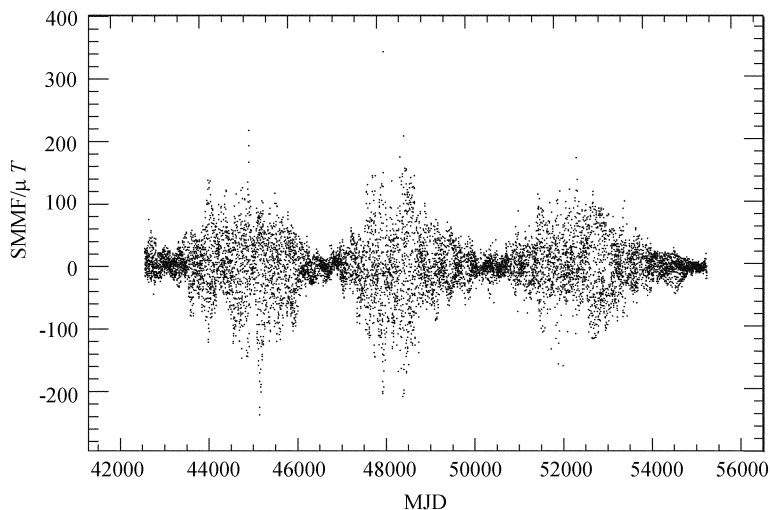


图 1 太阳平均磁场随时间变化

Fig. 1 Variation of SMMF with time

信号, 还能给出各个周期信号的虚警概率^[16]. 但对于 1 个频率为 ω_0 的真实周期信号, 数据的有限长度、数据分布的不规则性、光谱泄露和谐波等会导致功率谱图除了在频率 ω_0 处之外还在其他频率处出现峰值, 这些次峰可能具有显著高度. 判断 1 个具有显著高度的次峰是否是真实的周期信号的 1 个有效方法是: 先从原数据序列中过滤掉频率为 ω_0 的周期信号, 再重新计算功率谱. 若过滤后该次峰仍然存在, 则该次峰为真实周期信号. 如果功率谱图中包含多个周期, 此方法可重复使用. 在后面的周期分析中, 我们利用此方法确定数据中的真实周期信号.

周期信号频率的不确定性可通过 Kovacs 导出的频率标准偏差公式求得^[16,20]:

$$\delta\omega = \frac{3\pi\sigma_N}{2\sqrt{N_0}L_tA},$$

其中 A 是经正弦拟合得到的信号幅度, σ_N^2 是信号过滤后噪声的方差, N_0 是数据点数目, L_t 是数据的总长度. $\delta\omega$ 是从均匀分布的序列中推导而来, 但仍适用于非均匀分布的序列^[21].

3 数据分析结果和讨论

为了分析研究太阳活动极大和极小时期太阳磁场周期性的差别, 我们首先将太阳活动极大和极小期间的 SMMF 数据挑选出来. 由于太阳活动变化剧烈, 为了使数据既能分明太阳活动状况又保证足够的统计量, 我们在每个太阳活动极大时期和极小时期选择 3 yr 的连续数据做研究. 选择 1980~1982, 1989~1991, 2000~2002 年为 3 个太阳活动极大期, 1975~1977, 1984~1986, 1995~1997, 2007~2009 年为 4 个太阳活动极小期.

3.1 太阳活动极大期的 SMMF 周期分析

3 个太阳活动极大期 SMMF 的 Lomb-Scargle 傅立叶变换归一化功率谱如图 2 所示.

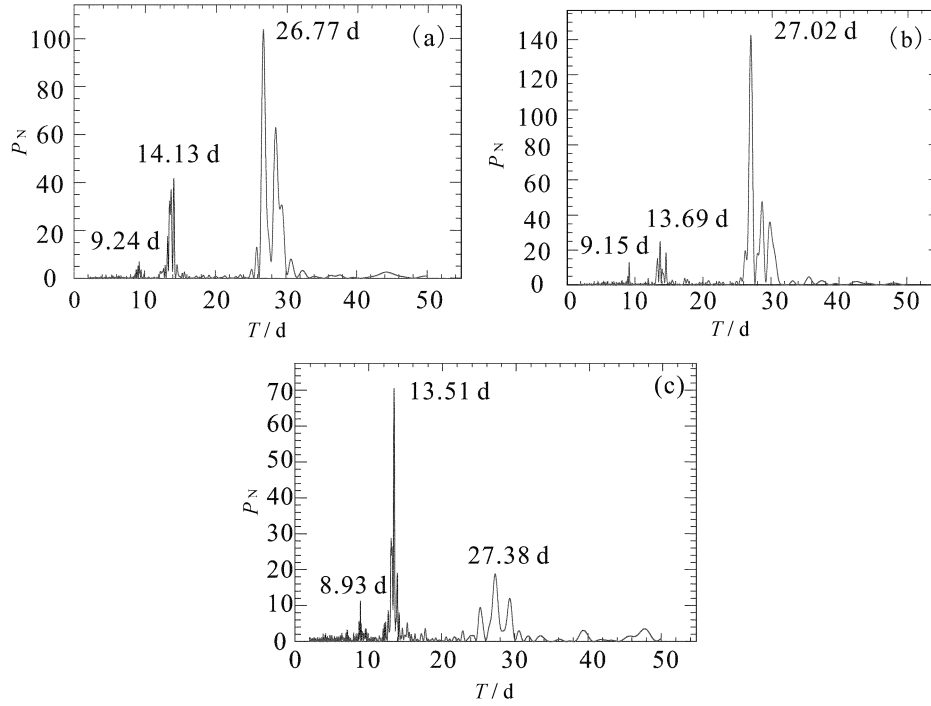


图 2 3 个太阳活动极大期的 SMMF 归一化功率谱. 从 (a) 至 (c) 依次为 1980~1982 年、1989~1991 年、2000~2002 年

Fig. 2 Normalized power spectrum of SMMF in each solar maximum.

(a) 1980~1982, (b) 1989~1991, (c) 2000~2002

由图可见, 3 个太阳活动极大期的 SMMF 都存在 27 d、13.5 d 和 9 d 左右的周期. 3 个太阳活动极大期最显著的周期分别是 (26.77 ± 0.02) d、 (27.02 ± 0.01) d 和 (26.40 ± 0.01) d, 相应的虚警概率均小于 10^{-13} ; 在 13.5 d 附近的周期分别为 (14.13 ± 0.01) d、 (13.69 ± 0.01) d、 (14.02 ± 0.01) d, 相应的虚警概率为小于 10^{-13} , 小于 10^{-13} , 5×10^{-10} ; 在 9 d 附近的周期分别为 (9.24 ± 0.01) d、 (9.15 ± 0.01) d、 (8.96 ± 0.01) d, 相应的虚警概率分别为 2×10^{-4} 、 4×10^{-12} 、 4×10^{-12} .

将活动极大期的 SMMF 时间序列数据分别折叠在上述周期内, 并进行平均计算^[22], 得到在太阳活动极大期 SMMF 9 d、13.5 d 和 27 d 周期信号在一个周期内的变化如图 3 所示.

图中的数据点表示 SMMF 在 1 个周期中的平均变化, 曲线表示经正弦拟合得到的结果, 拟合函数为 $p_0 \sin(2\pi\varphi + p_1) + p_2$. 根据图中拟合曲线得到, 1980~1982 年 9.24 d、14.13 d、26.77 d 周期信号的平均最大变化幅度分别为 10.3、24.6 和 40.8 μT ; 1989~1991 年 9.15 d、13.69 d、27.02 d 的为 17.3、25.3 和 57.9 μT ; 2000~2002 年 8.96 d、14.02 d、26.40 d 的为 15.4、13.5 和 36.8 μT .

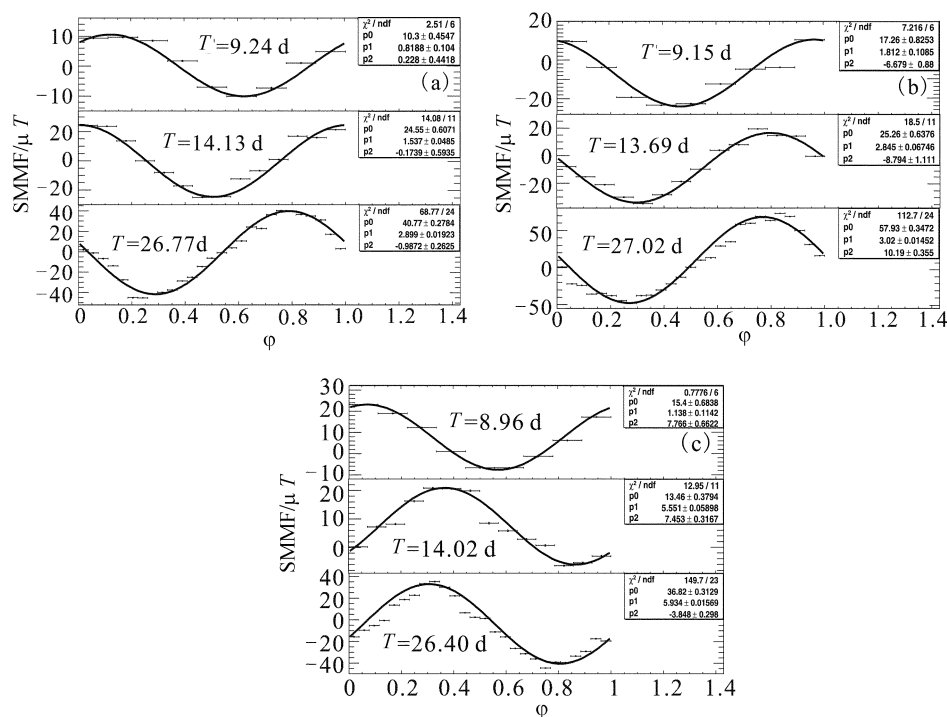


图 3 太阳活动极大期 9 d、13.5 d、27 d 左右周期信号在一个周期内的平均变化. 横坐标为 1 个周期内的相位, 纵坐标为 $SMMF/\mu T$. 从 (a) 至 (c) 依次为

1980~1982 年、1989~1991 年、2000~2002 年

Fig. 3 Mean variation of 9d, 13.5d, 27d periodical signal in one period in each solar maximum. The X-axis represents the phase in a period. The Y-axis represents $SMMF/\mu T$.

(a) 1980~1982, (b) 1989~1991, (c) 2000~2002

3.2 太阳活动极小期的 SMMF 周期分析

图 4 给出了 4 个太阳活动极小期 SMMF 的 Lomb-Scargle 傅立叶变换归一化功率谱. 图中显示, 每个活动极小期 SMMF 也都有 9 d, 13.5 d 和 27 d 左右的周期存在. 1975~1977 年 SMMF (9.32 ± 0.01) d, (13.51 ± 0.01) d, (27.55 ± 0.02) d 周期的虚警概率分别为 3×10^{-3} , 小于 10^{-13} , 小于 10^{-13} ; 1984~1986 年 (8.95 ± 0.01) d, (13.72 ± 0.01) d, (27.19 ± 0.02) d 周期的虚警概率均小于 10^{-13} . 1995~1997 年 (8.93 ± 0.01) d, (13.51 ± 0.01) d, (27.38 ± 0.04) d 周期的虚警概率分别为 2×10^{-4} , 小于 10^{-13} , 2×10^{-8} ; 2007~2009 年 (8.96 ± 0.01) d, (13.43 ± 0.01) d, (27.08 ± 0.01) d 周期的虚警概率分别为 6×10^{-13} , 小于 10^{-13} , 小于 10^{-13} . 值得注意的是在 1975~1977 年、1995~1997 年、2007~2009 年 3 个太阳活动极小期中, 功率谱最大峰值都出现在 13.5 d 附近, 只是 1984~1986 年间的活动极小期除外.

如图 5 所示, 1975~1977 年 SMMF 在 9.32 d、13.51 d、27.55 d 周期中的平均变化幅度分别为 2.5、11.0 和 9.4 μT ; 1984~1986 年在 8.95 d、13.72 d、27.19 d 周期中

的为 7.1、8.1 和 19.5 μT ; 1995~1997 年在 8.93 d、13.51 d、27.38 d 周期中的为 2.9、7.9 和 4.8 μT ; 2007~2009 年在 8.96 d、13.43 d、27.08 d 周期中的为 2.8、8.2 和 6.8 μT . 比较上述最大变化幅度可以看出, 除 1984~1986 年 SMMF 以 27 d 周期为主外, 在其它太阳活动极小期, SMMF 均以 13.5 d 周期为主.

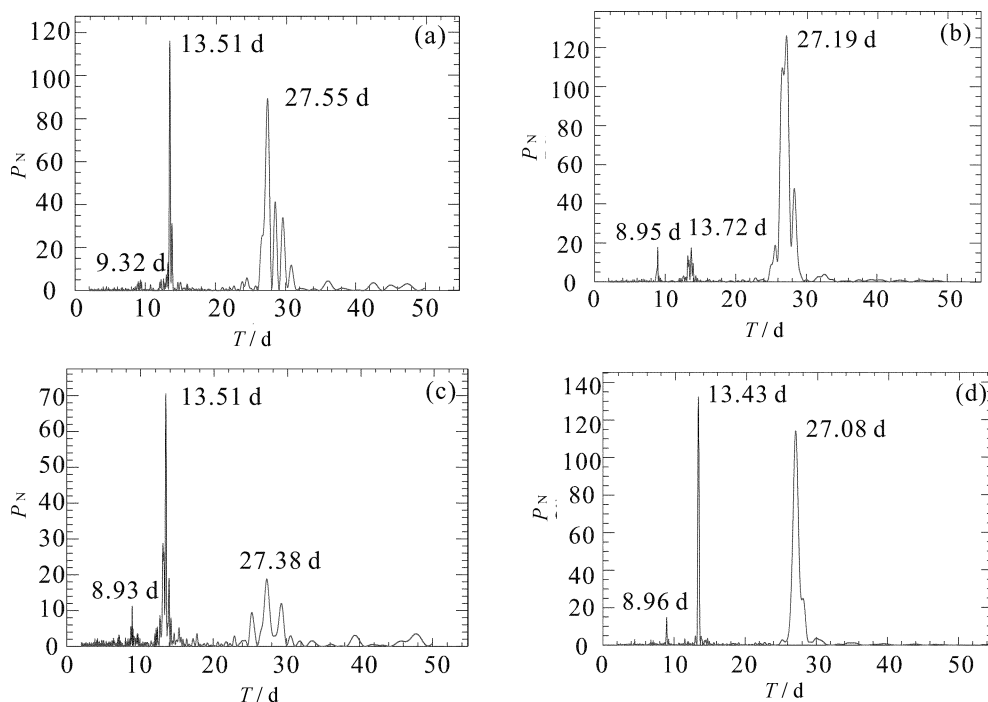


图 4 各太阳活动极小期的 SMMF 归一化功率谱从 (a) 至 (d) 分别为 1975~1977 年、1984~1986 年、1995~1997 年、2007~2009 年

Fig. 4 Normalized power spectrum of SMMF in each solar minimum, (a) 1975~1977; (b) 1984~1986; (c) 1995~1997; (d) 2007~2009

4 总结与讨论

利用 Wilcox 天文台 1975 年到 2010 年间的 SMMF 数据, 分析了 SMMF 在太阳活动极大和太阳活动极小期的周期性. 从上述分析中我们得到, 在所有太阳活动极大时期和极小时期 SMMF 都包括有: 源于太阳自转的 27 d 周期; 源于太阳上经度相差约为 180° 的两个活动区域的 13.5 d 周期 [6]; 源于经度相差 120 度的 3 个冕洞的 9 d 周期 [13]. 这些周期具有如下特征: 第一, 在太阳活动极大期 SMMF 各周期幅值比在太阳活动极小期大, 即周期信号更强. 第二, 在太阳活动极大期 27 d 的周期最显著, 在太阳活动极小期 13.5 d 的周期最显著 (1984~1986 年除外). 这样的周期特征说明: 太阳经度相差约为 180° 的两个活动区在太阳活动极小期表现突出, 而在活动极大期则不非常明显. 这反映了太阳

磁场的分布特点,也揭示了起源于太阳磁场的星际磁场的扇形结构特征.

SMMF 在 1984~1986 年间与其他 3 个太阳活动极小期的周期特征有明显差别,其 9 d、27 d 周期的变化幅度也明显大于其他太阳活动极小期时 SMMF 相应周期的变化幅度.引起这些现象的原因还有待进一步仔细研究.

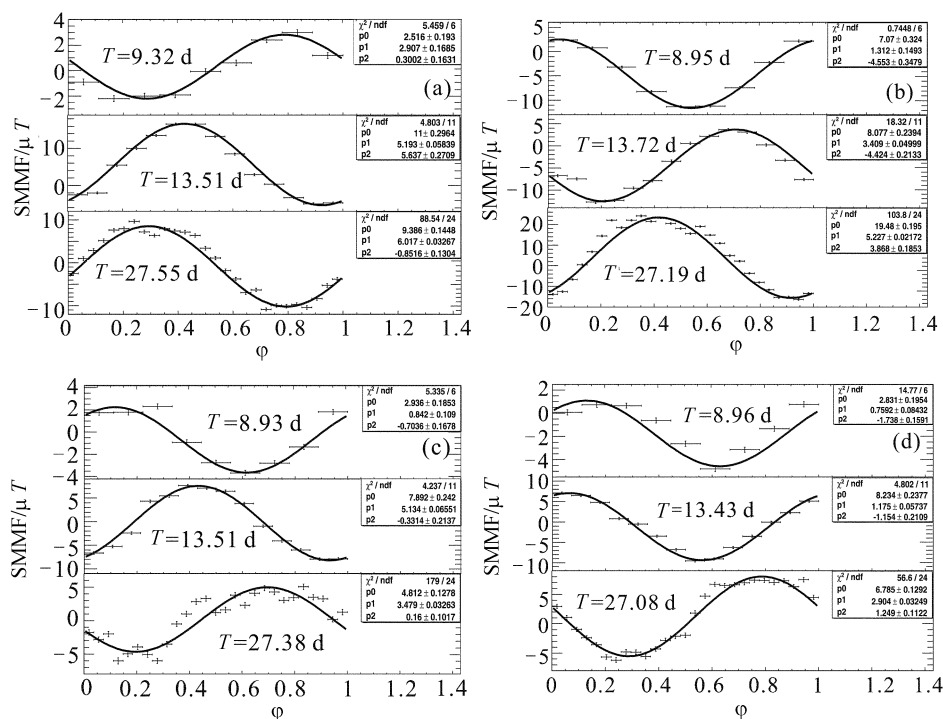


图 5 各太阳活动极小期 9 d、13.5 d、27 d 左右周期信号在一个周期内的平均变化.从 (a) 至 (d) 为 1975~1977 年、1984~1986 年、1995~1997 年、2007~2009 年

Fig. 5 Mean variation of 9 d, 13.5 d, 27 d periodical signal in one period in each solar minimum. (a) 1975~1977; (b) 1984~1986; (c) 1995~1997; (d) 2007~2009

致谢 此研究使用了 Wilcox 天文台的观测数据. Wilcox 天文台由斯坦福大学管理,由美国国家航空航天局 (NASA) 资助.

参 考 文 献

- [1] 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000: 21-22
- [2] Svalgaard L, Wilcox J M. SoPh, 1975, 41: 461
- [3] Neugebauer M, Smith E J, Ruzmaikin A, et al. JGR, 2000, 105: 2315
- [4] Henney C J, Harvey J W. SoPh, 2002, 207: 199
- [5] Haneychuk V I, Kotov V A, Tsap T T. A&A, 2003, 403: 1115
- [6] Donnelly R F, Puga L C. SoPh, 1990, 130: 369
- [7] Pap J, Tobiska W K, Bouwer S D. SoPh, 1990, 129: 165
- [8] Bobova V P, Stepanian N N. SoPh, 1994, 152: 291

- [9] Mursula K, Zieger B. JGR, 1996, 101: 27077
- [10] Das T K, Nag T K. SoPh, 1999, 187: 177
- [11] Boberg F, Lundstedt H, Hoeksema J T, et al. JGR, 2002, 107: 1318
- [12] Prabhakaran Nayar S R, Sanalkumaran Nair V, Radhika V N, et al. SoPh, 2001, 201: 405
- [13] Temmer M, Vršnak B, Veronig A M. SoPh, 2007, 241: 371
- [14] Lei J, Thayer J P, Forbes J M, et al. GeoRL, 2008, 35: L10109
- [15] Scherrer P H, Wilcox J M, Svalgaard L, et al. SoPh, 1977, 54: 353
- [16] Horne J H, Baliunas S L. ApJ, 1986, 302: 757
- [17] Lomb N R. Ap&SS, 1976, 39: 447
- [18] Scargle J D. ApJ, 1982, 263: 835
- [19] Press W H, Rybicki G B. ApJ, 1989, 338: 277
- [20] Kovacs G. Ap&SS, 1981, 78: 175
- [21] Baliunas S L, Horne J H, Porter A, et al. ApJ, 1985, 294: 310
- [22] 贾焕玉, 王顺金. 高能物理与核物理, 2001, 25: 277

Periodicity Analysis of SMMF in Solar Maximum and Minimum

YE Ni ZHU Feng-rong ZHOU Xue-mei JIA Huan-yu

(*Institute of Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031*)

ABSTRACT Using the data observed by Wilcox Solar Observatory from 1975 to 2010, the short periodicity of the solar mean magnetic field (SMMF) in solar maximum and minimum is analyzed. The result shows that SMMF has main periods about 9 days, 13.5 days, and 27 days. During the solar maximum, the SMMF has the most dominant period near 27 days. However, in solar minimum, the 13.5-day periodicity is most significant except in 1984-1986. These results show that the solar active region distribution in the solar maximum is quite different from that in solar minimum.

Key words sun: activity, sun: magnetic field