利用太阳周初期月黑子数上升率预报周峰值的检验

韩延本*, 尹志强, 王博

中国科学院国家天文台, 北京 100012

* 联系人, E-mail: hyb@bao.ac.cn

2017-05-10 收稿, 2017-06-28 修回, 2017-06-28 接受, 2017-09-22 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB957801)资助

摘要 简要介绍了利用太阳活动周初期月平滑太阳黑子数(SSN)的上升率预报太阳周极大值的方法. 利用回归方法计算太阳周初期24个月的月黑子数上升率, 分析得到上升率与太阳活动周极大值的定量关系, 依此对极大值的幅度做出预报. 检验了作者在2000年发布的利用这个方法提前对第23周极大值做出的预报, 其后与实际测量结果的比较表明预报与实际测量结果符合得较好, 预报值的相对误差约为实测值的15.2%. 同时本文重点介绍了利用该方法和国际上发布的新的V2.0版黑子序列对第22~24周的极大值统一进行的模拟预报, 以检验该方法的有效性, 结果表明对这3个活动周的模拟预报与实际测量结果符合得较好, 预报误差分别约为实测值的10.6%, 6.4%和15.2%. 作者认为该预报方法具有一定的应用价值.

关键词 太阳活动, 预报, 黑子上升率

约11年准周期分量是太阳活动最重要的波动成分, 其幅度在很大程度上代表着太阳活动的强度, 并依这个周期划分太阳活动周. 许多研究表明太阳活动以不同的程度影响着地球上许多现象的发生发展过程, 诸如气候变化、地球物理变化、海洋变化, 甚至影响着通讯、宇航、电力输送的安全和人体的健康. 出于对太阳活动变化特征研究的需要, 以及日地关系研究和空间科学发展的需要, 在最近的数十年间, 有关学者越来越重视太阳活动周特征和变化机理的研究^[1-6]. 国内外多年的研究已经表明, 太阳活动的变化过程和机理是极其复杂的, 例如其主要的约11年周期是时变的^[7,8], 这使得太阳活动预报具有很大的难度. 许多学者通过分析各太阳周黑子数变化的规律, 并结合太阳活动的其他指标及太阳活动与地球磁场变化的关系等, 预报未来的太阳活动周的黑子数峰值. 尤其是对最近的第22~24几个太阳周, 更多学者开展了预报研究, 形成了多种预报方法. 有的

学者利用回归分析或自回归模型分析SSN的变化特征进行预报^[9,10], 有的通过分析太阳活动的多个指标(黑子数、黑子群数、黑子面积和10.7 cm射电流量)与活动周幅度(RM)的关系进行预报^[11,12], 有的分析太阳周极大-极大之间的长度与RM的关系预报RM^[13]. 太阳活动影响地磁活动, 有的学者通过分析地磁活动对RM作出预报^[14,15], 或通过讨论太阳周下降段的特征预报未来周的RM^[16,17], 有学者利用相似周方法同时预报RM和月平滑值^[18-21]. 也有学者通过分析周初期的SSN变化率等方法预报RM^[22-25]. 这些预报结果将包括在下文的表中进行讨论, 这里不细述. 虽然经过人们数十年的太阳预报研究, 对许多预报结果的统计显示, 误差较小的预报所占的比例还比较小, 表明准确预报太阳周的峰值幅度仍然有很大的难度. 2000年, 韩延本^[26]简要介绍了通过研究太阳周初期月黑子数的上升率与周峰值的关系对第23周黑子数峰值进行了预报. 本文主要介绍所用的方法

引用格式: 韩延本, 尹志强, 王博. 利用太阳周初期月黑子数上升率预报周峰值的检验. 科学通报, 2018, 63: 311-317

Han Y B, Yin Z Q, Wang B. Test on the predictions of solar cycle using the rising rate of monthly sunspot number (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 311-317, doi: 10.1360/N972017-00506

及对第23周实际预报结果的检验,以及采用新的太阳黑子序列(V2.0)对第22~24太阳活动周进行模拟预报与实测结果的比较,并对其他方法的预报结果进行一定的比较分析,以期通过交流进一步了解该方法的特征,希望该方法能够得到进一步改进。

1 第22~24太阳周的预报

许多学者利用多种方法对第22和23太阳活动周黑子相对数月平滑值(SSN)峰值进行了预报, Le等人^[3]2001年收集了这两个活动周的预报结果,分别计有63例和48例,对预报值的分布特征进行了分析研究,讨论了一些预报方法的特点和预报精度。更多学者对第24太阳活动周进行了研究和预报, Pesnell^[1]于2008年发表了收集的对第24周的50余例预报的分析结果,其中15例为2006年前的预报,近半数在2006年,2007~2008年计有9例。2012年Pesnell^[2]发表的文章中,收集了2008~2009年间的一些预报,使分析的预报例增加到78例,其中2006~2008年间的预报计57例,有几例为2009年的预报。Pesnell^[27]于2016年又发表了他收集的关于24太阳周另外31个预报例的分析结果,其中除一例在2007年,其余均为2009~2014年间做的预报。Pesnell对预报结果的特征进行了综合分析,并研究和讨论了不同类型的预报方法的特点和预报精度。Abdel-Fattah等人^[28]2013年给出 101 ± 8 的预报结果,同时文中还列出了一些学者的预报,其中不在上述统计例的为: Bhatt等人^[29]: 111 ± 21 ; Kilcik等人^[30]: 87 ; Kane^[31]: 58 ± 25 ; Dabas等人^[32]: 131 ± 20 ; Pishkalo^[33]: 110.2 ± 33.4 ; Kane^[34]: 90 ± 20 ; Komitov等人^[35]: 72 ± 27 。本文作者另外收集了近些年几位学者的预报结果,它们是: Lozitsky等人^[36]: 90 ± 12 ; Khlystov等人^[37]: 63 ; Pishkalo^[38]: 90 ± 12 ; Miletskii等人^[39]: 80 ± 21.2 。2016年, Hamid等人(<http://cospar2016.tubitak.gov.tr/en/>, 2016)依据黑子、aa指数、10.7 cm射电流量等太阳活动指标与周极大值的关系研究得到几个不同的预报结果,分别是101.9, 108.3, 116.5和146。

这些预报中,众多学者采用的多种方法包括被认为比较成熟的、改进的和新的方法,它们大致可分为统计方法和与物理有关的先兆方法两大类^[22]。各预报方法给出的太阳周幅度预报值的分布很宽,对第24周超过百例的预报分布于42~185之间,近1/4预报例的误差大于实测值的50%。为了客观地比较各预报值与实测值的差异,文献[23]采用实测值的

$\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 作为相对误差范围,来考察第22和23周各预报值与实测值偏离的程度。为便于下面的讨论,把过去3个活动周峰值的各预报结果统计在表1中^[1,27~29]。对第24周,将Pesnell于2012年发表的结果(78例)、2016年发表的增加例数的结果(计109例)及其他作者发表的结果(增加到125例)分为3行列出,以显示随着时间的推移,预报结果精度的改进。

由表1可以看到,各位学者利用不同方法得到的这3个活动周峰值预报值弥散的范围多数是比较大的。对于各预报值的中间值与实测值的差异,处于实测值的 $\pm 10\%$ 范围内的比较少,处于 $\pm 20\%$ 范围内的比例也不是很大。同时我们也注意到,相对来说实施预报的时间越接近峰值出现的时间则预报的精度相对越高,以对开始于2008年12月的第24周(峰值出现在2014年4月)的预报为例, Pesnell于2012年发表的所收集的78例预报,预报误差处于实测值 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 范围内的比例分别为18%和28%,计入Pesnell(2016)收集的多数在2009~2014年间发表的31个预报例,预报误差处于实测值 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 范围内的比例分别为25%和34%。计入作者收集的此后一些学者主要在2010~2016年间发表的十多个预报值,两个比例数为26%和35%。总体来说,对未来的太阳活动周进行准确预报仍然具有很大的难度。

2 上升率法对太阳周峰值的预报及检验

太阳活动周存在Waldmeier效应,即太阳周上升段的时间长度与该周的强度反相关,上升的速率与周强度正相关^[24]。为能提前对太阳周做出预报,需要从太阳周初期SSN的变化规律中找到可能用于预报周峰值的定量信息。韩延本^[26]研究了第1~22太阳周开始后初期的SSN月值的变化规律与峰值的定量关系,并对开始于1996年下半年的第23周的峰值做了尝试预报。

审视过去太阳周SSN月值的变化,可以看到许多周开始后的数月或半年起,SSN增加得比较明显,在最初的2年或3年多里其变化趋势可近似用一条直线表示。采用线性回归方法计算各周开始后 m 个月的SSN变化(m 为正整数),定义回归直线的斜率 b 为周初期SSN的上升率,然后分析其与相应周峰值的关系,求得预报方程。计算表明,在周初期的数月间,回归直线的相关系数 r 较小,回归直线还不能很好地代表SSN上升的趋势。有研究认为,在活动周初期,黑

表 1 第 22~24 太阳活动周峰值预报结果的统计^{a)}

Table 1 Statistic of predictions of the maximum value for the 22nd to 24th solar cycles

SC	Npre.	RM	RMp	RMU1	N1(%)	RML1	RMU2	N2(%)	RML2
22	63	158.5	38~210	174.4	13(21)	142.6	190.2	22(35)	126.8
23	48	120.8	40~220	132.9	7(14)	108.7	145.0	13(27)	96.6
24	78 ^[1]	81.9	42~185	90.1	14(18)	73.7	98.3	22(28)	65.5
	109 ^[27]				27(25)			37(34)	
	125 ^[27-39]				32(26)			44(35)	

a) 表中SC表示周序号, Npre.为统计的预报例数, SSN实测值的13个月平滑值峰值记为RM, RMp栏列出的是相应活动周所有预报值的最大值和最小值的范围, 误差范围的上限分别为 $RMU1=RM \cdot (1+10\%)$ 和 $RMU2=RM \cdot (1+20\%)$, 下限分别为 $RML1=RM \cdot (1-10\%)$ 和 $RML2=RM \cdot (1-20\%)$. N1为处于RMU1与RML1之间的预报例数, 括号中为其占该周预报例数的百分数, N2为处于RMU2与RML2之间的预报例数, 括号中为其占该周预报例数的百分数, 依此比较各预报值与实测值偏离的程度

子的数目会受到两个临近的太阳周期重叠的影响, 导致其相关系数较小^[6]. 试验发现在 $m=12$ 时, r 仅约为0.6, 随着月数 m 的增加, r 在快速增大. 虽然各周的 r 值大时也并不预示着最终可以得到好的预报结果, 但是在采用该方法时, 至少希望 r 值尽可能大, 这样得到的 b 值才能更好地反映周初期的SSN上升趋势. 当 $m=18$ 时, 各周的 r 值已普遍较大, 多数接近或有的大于0.9, 且 m 再增加时, r 增大的速率变小, 此时的 b 已能较好地表示周初期SSN的变化. 当 $m=24$ 时, 超过4/5的太阳周的 $r \geq 0.9$, 近半数周的 $r \geq 0.95$, 此时的 b 值能很好地表示周初期SSN的变化. Du等人^[22]简洁地定义自太阳周开始后的某个月至极小值(Δm)间的差值与月数的比值为上升率, 他们发现在各太阳周到达第20个月时, 相关系数出现拐点($r > 0.8$), 此后趋向于平稳.

进一步用线性回归分析得到1~22周的各个 b 值与相应峰值RM的相关关系及有关参数, 相关系数达到0.90, 说明它们之间在99.9%的置信水平上是密切相关的, 由此可以对未来的极大值进行预测, 得到预报第23周峰值的方程为^[26]

$$RM = (53.98 + 28.98b) \pm 18.8, \quad (1)$$

求得第23周初期24个月的SSN的上升率为2.94, 代入(1)式得到该周的峰值预报值为 139.2 ± 18.8 . 2000年年末显示由该周观测值得到的 $RM=120.8$, 处在我们的预报值误差范围内, 预报值大于实测值约15.2%.

3 上升率法对22~24太阳周峰值的模拟预报

在下面的分析中将采用SSN的新数据的13个月平滑值序列用该方法对第22~24太阳周进行统一的模拟预报, 以进一步检验该方法的有效性. 依据观测资料计算得到的SSN相对数序列已有200多年, 是开展太阳物理和日地关系研究的宝贵资料, 这个数据序列的质量一直受到众多学者的关注. 在2011~2014年

间由美国国家太阳天文台(NSO)和比利时皇家天文台(ROB)等主持召开了多次有关的研讨会, 分析了过去太阳黑子及黑子群数的观测资料, 修订了计算黑子相对数的参数等, 计算出了V2.0版新的太阳黑子相对数月均值及13个月平滑值序列, 以往的序列记为V1.0版本(详细信息见文献[40]). 自2015年7月1日起开始应用V2.0版本SSN序列, V1.0版的序列已不再发布. 作者由网站(<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>)下载了V2.0版SSN的13个月平滑值数据序列, 由此给出各周开始的时间及周幅度(以最小值作为活动周开始的时间). 为清楚起见, 将两版本13个月平滑SSN值绘于图1中, 可以看出, 新版的SSN值比旧版的普遍增大了, 而总体的变化趋势和主要形态是基本相似的.

利用新序列SSN对第22~24太阳周进行统一模拟预报的过程与前述对第23周进行的预报类似, 即先求得各周初期1~24个月SSN的上升率, 再分别将过去21~23个活动周的极大值与上升率做回归分析, 相关系数分别为0.812, 0.811, 0.810. 得到这3个活动周的预报方程如下式:

$$RM = (92.04 + 27.82b) \pm 35.87, \quad (2)$$

$$RM = (93.14 + 27.17b) \pm 35.29, \quad (3)$$

$$RM = (92.85 + 27.10b) \pm 34.52. \quad (4)$$

为给读者比较清晰的印象, 我们把计算分析结果表示在图2~4中. 图2为1~21太阳周的峰值RM与上升率 b 值的回归直线, 并显示了第22周模拟预报值的位置及误差棒(由带有误差棒的黑圆点表示). 图3和4分别为对第23和24周的计算分析及模拟预报结果的图像. 同时, 我们将预报值与实测值的比较列于表2.

由上述对第23太阳周峰值幅度预报的讨论和检验, 以及利用V2.0版本SSN数据对第22~24周峰值幅度模拟预报及与实测值的比较, 可以看出对于13点

图1 V1.0与V2.0版13个月平滑SSN值的变化曲线

Figure 1 Curve of 13-month smoothed SSN of V1.0 and V2.0

图2 第1~21太阳周的RM与b值的回归直线和第22周RM预报值及误差棒

Figure 2 The regressing line between RM and b of 1–21 solar cycles, prediction of RM and error bar for 22nd cycle

图3 第1~22太阳周的RM与b值的回归直线和第23周RM预报值及误差棒

Figure 3 The regressing line between RM and b of 1–22 solar cycles, prediction of RM and error bar for 23rd cycle

月平滑SSN序列, 利用太阳周初期的SSN上升率预报周峰值幅度具有不太大的相对误差, 预报误差均没有超过1倍标准偏差, 最大的相对误差仅为实测值的15.2%。因此我们认为, 本文所用的方法可以得到预报误差相对较小的预报结果, 有一定的应用价值。

图4 第1~23太阳周的RM与b值的回归直线和第24周RM预报值及误差棒

Figure 4 The regressing line between RM and b of 1–23 solar cycles, prediction of RM and error bar for 24th cycle

4 结语与讨论

通过对国内外学者最近几个太阳活动周峰值众多预报值与实测值的比较分析可以看出, 对未来太阳活动周的黑子相对数峰值做出较准确预报的确还有很大的难度。如文献[21]所说, 先兆方法连续几周(20~22)进行了较为准确的预报而被普遍接受, 但该方法对第23周却失效了, 其预报的结果普遍偏高。作者认为, 出现这种情况的主要原因可能因为太阳活动具有极为复杂的变化特征, 而人们在这方面的认识还有待于深入, 因此进行物理预报也同样有较大的难度。再加上过去几个太阳活动周一直保持着较高的活动水平, 一些统计预报方法容易得到偏高的预报结果。第24太阳周的初期经历了较长时间的无黑子日, 有学者研究认为第24周是一个异常的太阳活动周, 甚至不排除其无黑子日数是现代黑子周内

表 2 利用新序列SSN对第 22~24 太阳周进行模拟预报的统计结果^{a)}

Table 2 Statistic of simulating predictions for the 22~24 solar cycles using new SSN

SC	Mon	RM	RMp	DRM	PDRM
22	1~24	212.5	234.95	22.4	10.6%
23	1~24	180.3	191.92	11.6	6.4%
24	1~24	116.4	134.10	17.7	15.2%

a) 表中SC为活动周序号, Mon为用于预报的活动周初期SSN的月数范围, 例如1~24即采用了第1~24个月的SSN, RM为实测的周极大值, RMp为RM的预报值, DRM为RM的预报误差, PDRM为RM预报的相对误差, 即 DRM/RM (百分数)

最多的可能^[41,42]. 第24周的活动性低于第23周, 是幅度偏低的活动周, 在对其幅度的预报例中, 多数偏大, 有的误差很大. 因此, 需要不断加强太阳活动规律的研究, 以及加强对未来太阳活动周活动水平预报方法的研究, 以优化得到相对更好的预报理论和方法, 不断提高太阳活动预报的水平.

人们对太阳活动物理过程和规律的认识还有待深入研究, 因此, 物理预报的难度也很大. 目前, 许

多学者采用统计方法用来进行太阳活动预报. 一些作者的分析表明, 很多统计方法的预报效果并不好, 这主要与统计方法是否恰当, 以及统计结果是否真实地反映了统计对象存在的变化规律有关. 我们采用了利用太阳活动周上升段初期24个月的13个月平滑SSN上升率的方法, 对第23周进行的实际预报得到较好结果, 采用SSN新序列对第22~24周的统一模拟预报也得到了较好的预报结果, 峰值预报值与实测值比较接近(最大的预报误差为实测值的15.2%). 这样得到的统计结果可能较好地反映了太阳周初期SSN上升率与周幅度的内在联系, 不过这毕竟只是通过3个太阳活动周的预报值与实测值的比较, 还不能说这个方法是完全成功的, 需要进一步的检验, 特别是有些太阳周的活动特点是非常复杂的. 同时, 因为利用的是活动周初期24个月的黑子数上升率, 对13个月黑子数平滑值序列来说, 要在活动周开始后的第31个月才能得到24个月的平滑值来计算黑子上升率, 而上升段的时间一般约为3~5年, 这样使得预报的时间提前量不够大, 对该方法做进一步的改进是必要的.

致谢 作者采用了<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>发布的V2.0版太阳黑子数据, 对网站表示感谢. 感谢国家空间天气监测预警中心乐贵明研究员、中国科学院国家天文台杜占乐研究员在本工作中给予的帮助和有益的讨论.

参考文献

- 1 Pesnell W D. Predictions of solar cycle 24. *Sol Phys*, 2008, 252: 209–220
- 2 Pesnell W D. Solar cycle predictions. *Sol Phys*, 2012, 281: 507–532
- 3 Le G M. Wavelet analysis of the Schwabe cycle properties in solar activity. *Chin J Astron Ast*, 2004, 4: 578–582
- 4 Le G M, Wang J L. Wavelet analysis of several important periodic properties in the relative sunspot numbers. *Chin J Astron Ast*, 2003, 3: 391–394
- 5 Jiang J, Wang J X, Zhang J H, et al. What drives the solar magnetic cycle (in Chinese)? *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2973–2985 [姜杰, 汪景琇, 张敬华, 等. 驱动太阳磁周期的原因是什么? 科学通报, 2016, 61: 2973–2985]
- 6 Jiang J, Cameron R H, Schmitt D, et al. The solar magnetic field since 1700. I. Characteristics of sunspot group emergence and reconstruction of the butterfly diagram. *Astron Astrophys*, 2011, 528: A82
- 7 Li K J, Su T W, Liang H F. Periodicity of sunspot activity in the modern solar cycles. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 2247–2252 [李可军, 苏同卫, 梁红飞. 现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性. 科学通报, 2004, 49: 2511–2516]
- 8 Han Y B, Han Y G. Wavelet analysis of sunspot relative numbers. *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 609–612 [韩延本, 韩永刚. 太阳黑子相对数变化的小波分析. 科学通报, 2001, 46: 2031–2034]
- 9 Liao D C, Liao X H. A statistical prediction of maximum value of sunspot numbers in 23rd cycle (in Chinese). *Ann Shanghai Astron Observatory CAS*, 2001, 22: 44–49 [廖德春, 廖新浩. 第 23 周太阳黑子相对数峰值的统计预报. 中国科学院上海天文台年刊, 2001, 22: 44–49]
- 10 Werner R. Sunspot number prediction by an autoregressive model. *Sun Geosphere*, 2012, 7: 75–80
- 11 Cameron R, Schussler M. A robust correlation between growth rate and amplitude of solar cycles: Consequences for prediction methods. *Astrophys J*, 2008, 685: 1291–1296
- 12 Hathaway D H, Wilson R M. Group sunspot numbers: sunspot cycle characteristics. *Solar Physics*, 2002, 211: 357–370
- 13 Du Z L. Relationship between solar maximum amplitude and max-max cycle length. *Astron J*, 2006, 132: 1485–1489

- 14 Thompson R J. The rise of solar-cycle number-22. *Sol Phys*, 1988, 117: 279–289
- 15 Hathaway D H, Wilson R M. Geomagnetic activity indicates large amplitude for sunspot cycle 24. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L18101
- 16 Yoshida A, Yamagishi H. Predicting amplitude of solar cycle 24 based on a new precursor method. *Ann Geophys*, 2010, 28: 417–425
- 17 Du Z L, Du S Y. The relationship between the amplitude and descending time of a solar activity cycle. *Sol Phys*, 2006, 238: 431–437
- 18 Wang J L, Han Y B. Forecasts of smoothed monthly mean sunspot numbers and non-smoothed monthly mean sunspot numbers for solar cycle 23. *Astrophys Rep*, 1997, 1(Suppl): 76–80
- 19 Han Y B, Wang J L. Preliminary verification of sunspot predictions of cycle 23 by the method of similar cycles. *Chin Astron Astr*, 1999, 23: 139–142
- 20 Wang J L, Miao J, Liu S Q, et al. Prediction of the smoothed monthly mean sunspot numbers for solar cycle 24. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2008, 51: 1938–1946 [王家龙, 苗娟, 刘四清, 等. 第24太阳周太阳黑子数平滑月均值预报. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1097–1105]
- 21 Miao J, Liu S Q, Wang J L, et al. Long-term solar cycle prediction methods and evaluation of predictions for solar cycle 23 (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2007, 4: 53–58 [苗娟, 刘四清, 王家龙, 等. 太阳活动长期预报方法与第23周太阳活动预报评估. 载人航天, 2007, 4: 53–58]
- 22 Du Z L, Wang H N. Predicting the solar maximum with the rising rate. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 365–370
- 23 Li K J, Yun H S, Gu X M. On long-term predictions of the maximum sunspot numbers of solar cycles 21 to 23. *Astron Astrophys*, 2001, 368: 285–291
- 24 Karak B B, Choudhuri A R. The Waldmeier effect in sunspot cycles. In: *Magnetic Coupling Between the Interior and Atmosphere of the Sun*. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2010. 402–404
- 25 Uzal L C, Piacentini R D, Verdes P F. Predictions of the maximum amplitude, time of occurrence, and total length of solar cycle 24. *Sol Phys*, 2012, 279: 551–560
- 26 Han Y B. A method to predict amplitude and date of maximum of solar cycle. *Chin Sci Bull*, 2000, 45: 1287–1290 [韩延本. 太阳黑子相对数峰值及其出现时间的一种预测方法. 科学通报, 2000, 45: 356–359]
- 27 Pesnell W D. Predictions of solar cycle 24: How are we doing? *Space Weather*, 2016, 14: 1–12
- 28 Abdel-Fattah A, Ismail H A, Basurah H M. A Neuro-Fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25. *Astrophys Space Sci*, 2013, 344: 5–11
- 29 Bhatt N J, Jain R, Aggarwal M. Prediction of the maximum amplitude and timing of sunspot cycle 24. *Solar Phys*, 2009, 260: 225–232
- 30 Kilcik A, Anderson C N K, Rozelot J P, et al. Nonlinear prediction of solar cycle 24. *Astrophys J*, 2009, 693: 1173–1177
- 31 Kane R P. Size of the coming solar cycle 24 based on Ohl's Precursor Method, final estimate. *Ann Geophys*, 2010, 28: 1463–1466
- 32 Dabas R S, Kavita S. Prediction of solar cycle 24 using geomagnetic precursors: Validation and update. *Solar Phys*, 2010, 266: 391–403
- 33 Pishkalo M I. Prediction of amplitude of solar cycle 24 based on polar magnetic field of the sun at cycle minimum. *Sun Geosph*, 2010, 5: 47–51
- 34 Kane R P. Prediction of the size of coming solar cycle 24 based on solar parameters during sunspot minimum between cycles 23 and 24. *Indian J Radio Space Phys*, 2011, 40: 72–75
- 35 Komitov B, Duchlev P, Stoychev K, et al. Determination of the sunspot minimum epoch between the cycles No 23 and 24 and prediction of the cycle No 24 magnitude on the base of the "Waldmeier's Rule". *Bulgarian Astron J*, 2011, 16: 44–49
- 36 Lozitsky V, Efimenko V. Forecasting of solar activity in 24th cycle taking into account its non-monotonous grown phase. *Astronomy*, 2013, 50: 30–32
- 37 Khlystov A, Somov B. A new empirical method for predicting of the solar cycles main parameters. In: *Proceedings of 40th COSPAR Scientific Assembly*. Moscow, 2014
- 38 Pishkalo M I. Prediction of solar cycle 24 using sunspot number near the cycle minimum. *Solar Phys*, 2014, 289: 1815–1829
- 39 Miletskii E V, Ivanov V G, Nagovitsyn Y A. Reversals of solar polar magnetic field, amplitudes of 11-year cycles, and special points of sunspot latitude parameters. *Geomagnet Aeron*, 2015, 55: 1045–1048
- 40 Clette F, Svalgaard L, Vaquero J M. Revisiting the sunspot number a 400-year perspective on the solar cycle. *Space Sci Rev*, 2014, 186: 35–103
- 41 Li K J, Feng W, Liang H F. The abnormal 24th solar cycle—The first complete solar cycle of the new millennium (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2010, 40: 1293–1301 [李可军, 冯雯, 梁红飞. 异常的第24太阳活动周——新千年的第一个完整的太阳活动周. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 1293–1301]
- 42 Jiang J, Cameron R H, Schüssler M. The cause of the weak solar cycle 24. *Astrophys J Lett*, 2015, 808: L28

Summary for “利用太阳周初期月黑子数上升率预报周峰值的检验”

Test on the predictions of solar cycle using the rising rate of monthly sunspot number

Yanben Han^{*}, Zhiqiang Yin & Bo Wang

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

^{*} Corresponding author, E-mail: hyb@bao.ac.cn

The period of about 11-year is the most significant quasi-periodic component in solar activity. The amplitude of the period is often used to indicate the activity intensity of a solar cycle. Solar activity affects the space weather, spaceflight and Earth climate. Solar physical scientists pay attention to studies of solar activity, and some geo-scientists are interested in the relationship between solar activity and some geophysical phenomena. So prediction of relative number of sunspots (SSN) has attracted the attention of many scientists in order to understand the activity of new solar cycle and study the variation of geophysical phenomena. Some prediction methods were used to predict the amplitude of the coming solar cycle, especially for the prediction of the amplitudes for solar cycles 22–24. The results show that only about 1/3 are better in many predictions, the relative predicted error is less than 20%. So it is still difficult to accurately predict the maximum of SSN. In 2000, the amplitude for solar cycle 23 was predicted using rising rate of SSN in earlier ascending phase of cycles by Han. The subsequent compare of actual maximum and prediction showed that the relative predicted error is about 15.2%. The motivation of this paper is to simply introduce how to use the method to predict the solar cycle 23, test the simulation prediction for solar cycle 24 using the new version SSN series (V2.0), and compare the results with those obtained by other researchers using different methods, in order to proof-test the ability of the method.

The method uses regression analysis to calculate the rising rates of monthly smoothed SSN in initial stage of past solar cycles, and then calculate the quantitative relationship between the rising rates and corresponding maximums of the solar cycles using regression analysis again. Some tests show that they have high correlation when we use SSN in 1–24 months of initial stage of past solar cycles. Then we calculate the rising rate and use the rate to predict the amplitude of the coming solar cycle.

The paper focuses on the simulative predictions of maximum amplitude for 22–24 cycles using the method and V2.0 SSN series. For the 3 cycles, predicted values of maximum amplitudes are 234.9, 191.9 and 134.1, they are in good agreement with the actual values, 212.5, 180.3, 116.4, and the relative prediction errors are about 10.6%, 6.4% and 15.2%, respectively. This shows that the prediction method has a certain application value possibly.

Anyway, the studies of solar activity characteristics should be continually enhanced, as well as the studies of methods for predicting the solar activity in the future, to select relatively better prediction methods and improve the level of solar activity prediction. Meanwhile, the rising rate is obtained by the SSN in 1–24 months of the initial stage of a cycle, for the monthly smoothed SSN series, only at the 31st month after the beginning of a cycle can get smoothed values of 24 months and then to calculate rising rate. However, the rising stage is about 4–6 a, which makes the predicted leading time to be not long enough. The authors are considering the improvement of this method and to do more tests.

solar activity, prediction, number of sunspots rising rate

doi: 10.1360/N972017-00506