

# 太阳活动长期预报方法与第 23 周 太阳活动预报评估

苗娟<sup>1</sup> 刘四清<sup>1</sup> 王家龙<sup>2</sup> 龚建村<sup>1</sup>

(1 中国科学院空间环境研究预报中心 2 中国科学院国家天文台)

**摘要** 在载人航天前期的空间环境预报保障中,已经开展了太阳活动长期预报研究,并在工程中得到了初步的应用。第 24 太阳活动周即将开始,随之开展太阳活动长期预报工作的主要内容是:一方面,调研总结多种太阳活动长期预报方法的特点,比较不同预报方法对 23 周的预报结果;另一方面,比较“相似周”预报方法与国际空间环境权威预报机构对第 23 周太阳活动的预报。通过从整体形态、误差分析、置信区间和预报准确率等方面的综合评估得出,利用“相似周”预报方法的预报结果更接近实测结果。

**关键词** 太阳活动长期预报 太阳黑子数 10.7cm 太阳射电流量

## 1 引言

空间环境对航天活动的影响已受到各部门、各技术系统的重视,无论是航天设计、发射和回收,还是飞行计划编制、轨道飞行姿态控制、高频无线电通讯等航天设计和操作过程,都需要考虑空间环境的影响。太阳活动是空间环境重要的扰动源头,是引起空间环境灾害性事件的主要原因。太阳活动水平的高低直接影响到近地空间环境状态(大气环境、电离层环境等)。在太阳活动剧烈变化的情况下,大气密度可达到数倍的变化幅度,严重影响正常的轨道维持。因此对太阳活动准确的预报是空间环境预报工作者致力研究的重要课题之一。

太阳黑子数和太阳 10.7cm 射电流量(F10.7)是表征太阳活动水平高低的两个重要参数,在大气环境和航天器寿命、辐射环境及电离层环境等的预报中,都需要考虑这两个参数的变化。太阳活动的长期预报主要是对太阳黑子数和 F10.7 的预报。研究者对太阳活动预报研究的重视是从 1957-1958 年(第 21 太阳活动周峰值期)开始,当时太阳活动水平远远超过了人们的预期水平,ICSU(国际科学联盟委员会)将 1957.7-1958.12 定为国际物理年(IGY)。之后,在太阳活动周的不同阶段,都有很多机构和研究者

采用各种方法对太阳黑子数和 F10.7 进行预报。中科院空间环境预报中心是长期从事太阳活动参数预报研究的单位之一,在我国载人航天前期任务中,一直承担着对航天活动的空间环境保障任务,其中任务之一就是为有关部门提供太阳活动参数(F10.7)和地磁 Ap 指数的预报。在第 23 太阳活动周期间,我们利用“相似周”方法对太阳黑子数和 F10.7 进行了长期预报,并在我国载人航天任务大气环境计算和轨道衰变预测中得以应用。

第 24 太阳活动周即将开始,为了更好地开展太阳活动的长期预报工作,更好地服务于载人航天后期任务。我们一方面调研总结了多种太阳活动长期预报方法的特点,比较了不同预报方法对 23 周的预报结果。另一方面,比较了“相似周”预报方法与国际空间环境权威预报机构对第 23 周太阳活动的预报。

## 2 太阳活动长期预报方法

太阳活动长期预报主要是预报太阳黑子数的长期变化,特别是黑子数的太阳周变化。虽然太阳物理界有人认为黑子数是一个缺乏物理意义的统计量,并且不断试图寻找新的更有物理意义和合理的活动代表量。但是由于黑子相对数已有二百多年的观测历史,积累的资料多、完整,作为一个统计量能清楚

地表征太阳活动的周期性,又受到非太阳专业工作者的习惯使用,它同地磁、水文、气象、地震等的相关已有了不少研究,所以在长期活动预报中黑子数始终受到头等重视。目前对太阳黑子周或更长期的黑子活动的预报都是使用统计方法。这些方法按其预报机理大体可分为四种:

#### (1)长周期变化特征法

把黑子数的变化作为时间函数做统计预报,这种方法假设未来的太阳黑子活动遵从某种统计规律,如周期变化等,再根据当前的观测资料及已经发现的规律来预测未来的黑子活动情况。这类方法被广泛地用于预报,其中比较典型的是把黑子数随着时间的变化或分布,看成一个非平稳随机时间序列,来描述以往的黑子活动,并对未来的活动情况做出预报。

#### (2)活动周参数法

利用不同活动周或活动周内部各参量之间的关系做预报,预测未来太阳黑子相对数极大值及其时间位置。研究者通过对表示太阳周之间或太阳周内部各种参量的分析,统计出相关公式。比如通过分析黑子相对数时间变化曲线,容易发现奇数黑子周与偶数黑子周形态上有所不同,可以把它们分开或成对地进行预报方面的研究,从而给出预报方程。

#### (3)地球物理现象先兆法

此法不直接用太阳量的测量作太阳活动预报,而是利用极小期或下降期的地球物理量的测量来预报下一个太阳周黑子数极大值。其指导思想是极小期的地球物理现象通过极小期太阳磁场活动必然与极大期太阳活动有关。这种方法最早是由 Ohl(1966 年)提出来的,他发现在太阳活动下降期的地磁活动水平和下一太阳活动周的峰值水平有一定相关性,1976 年 Ohl 运用第 20 周下降期的地磁活动预测得到 21 周黑子数峰值范围 140~180 之间(实际观测值为 155)。

#### (4)行星位置法

由于行星在太阳上的潮汐作用与行星相对于太阳的位置有关,这种预报主要研究行星位置的变化或者太阳相对于太阳系质心的位置变化与太阳黑子活动或耀斑活动的关系。但行星在太阳上的潮汐力对太阳活动的影响究竟有多大,在决定太阳活动的幅度上起怎样的作用,能否用行星的作用来预报太阳活动等等,一直是在争论的问题。

在近几十年对太阳黑子数的长期预报研究过程中,研究者采用了许许多多的方法对太阳活动进行

预报:黑子数长短周期法、RM 变化趋势法、奇偶周法、时间序列法、地磁先兆法、相似周法及大尺度磁场动力学等等。由于研究者采用方法的不同,对同一活动参数的预报结果差异也比较大。在第 23 活动周以前,由于先兆方法在连续几周(20~22)进行了较为准确的预报,因而这种方法被普遍接受,但这种方法在第 23 周却失效了,它预报的结果普遍偏高,表 1 是给出部分研究者<sup>[1,27]</sup>对第 23 周太阳黑子数月均平滑值的预报结果和采用的预报方法。

表 1 第 23 太阳活动周预报方法及预报结果

作者(年)	预报方法	预报结果
Schove(1983)	黑子数长期变化特征	85-120
Chistyakov(1983)	黑子数变化特征	75
Kontor(1983)	黑子数长期变化特征	110
Tritakis(1986)	上升/下降特征关系	140±10
Wilson(1988)	地磁先兆法	175±40
Makarov (1991)	大尺度磁场动力学	>160
Kopecky(1991)	奇偶周法	208
Wilson(1992)	奇数周法	136±42
	奇偶差值法	199±14
	RM 变化趋势法	164±34
	RM 奇数周 Vs RM 偶数	214±14
Rivin(1992)	奇偶周法	225±8
Schatterm(1993 年)	太阳磁场	170
Letfus(1994)	地磁法	181
Calvo,Ceccatto(1995)	时间序列法	167
Jain(1997)	地磁法	166
Thompson(1996)	地磁法	164
Brava,Stewar(1997)	太阳磁场法	150-190
Boumar,Cliver(1997)	地磁法	158
Li(1997)	地磁法	149
Wang,J.L(1997)	相似周法	127
Shastri(1998)	地磁法	152
Wilson,Hathaway,Reichmann(1998)	综合法	171±18
Rangarajan(1998)	时间序列法	130
Kane(1999)	时间序列法	140
Ahluwalia(1998)	地磁法	120
Hathaway, Wilson, Reichmann	综合法	154±21
Hanslmeier,Denkmayer(1999)	综合法	160
Boulder Prediction Center(2000)	综合法	133

通过表 1 中各预报结果来看,不同研究者预测的结果差异比较大,范围从 75~225 不等(实测峰值为 120.8)。同时,对于多数研究者而言,由于方法的限制,往往只能给出所预报的活动周太阳黑子数的极值或极值出现时间,而很少能够给出整个预报区间每个月的预报值,这不能满足用户需求。再者,太阳 10.7cm 射电辐射流量(F10.7)是用户需要的另一

个重要太阳活动参数,而用于太阳黑子数的预报方法往往大多数不适用于 F10.7 预报。比较而言,“相似周”预报方法在太阳活动周长期预报中是一种很有应用价值的预报方法,它既可以预报给出峰值及峰值时间,也能给出逐月预报值,同时也适用 F10.7 预报。同时由于此方法是以活动周的主要特征参数为预报基础,参数确定之后,预报提前量多则可以达 10 多年,且预报结果稳定、误差不递推。

### 3 第 23 周预报结果评估

从业务运行和用户服务方面来看,对太阳活动参数太阳黑子和 F10.7 的月值预报从第 23 活动周开始,目前国际空间环境预报权威机构公开发布的主要有国际空间环境预报组织(ISES)的澳大利亚分中心 IPS 电波和空间服务组织、NASA、SEC 等。ISES 的 IPS 最早是 2000 年 11 月开始公开发布预报, NASA 是 1999 年 3 月开始发布预报, SEC 的预报则是建立在 ISES 预报基础之上的,预报结果均每月修改更新一次。中国科学院空间环境研究预报中心也是 ISES 的成员之一,1997 年开始采用“相似周”方法对第 23 周的黑子数和 F10.7 进行预报,预报结果稳定。

下面我们针对第 23 太阳活动参数(太阳黑子数和 F10.7)的逐月值预报,对我们采用“相似周”方法的预报结果与国际空间环境预报权威机构同期发布的预报结果进行评估。

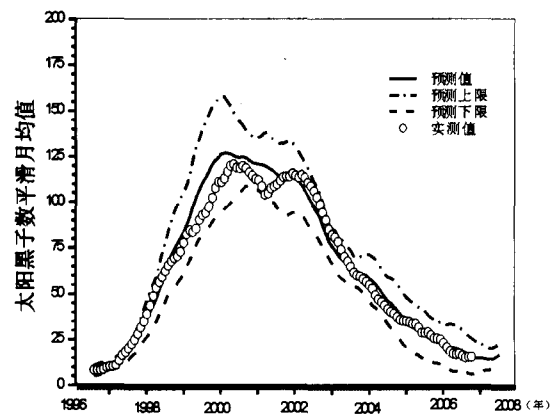
“相似周”预报方法是王家龙等<sup>[20]</sup>于 1997 年提出并应用到第 23 太阳活动周的黑子数预报中。“相似周”预报方法是在相似预报理论的基础上提出来的,它的基本预报假设是:当某个太阳活动周的主要特征参数(如黑子数的极大值、极小值及上升相与下降相的时间长度)与历史上已有太阳活动周的特征参数接近时,该活动周的其他未知特性也与之接近。基于这一假设,就可以通过对未来活动周的特征参数与以往活动周的特征参数的比较,挑选出该活动周的相似周,然后用相似周的平均特性来描述该活动周的特性。

1997 年王家龙等利用“相似周”方法,用第 8、9、11、17、18、20 和 21 七个相似周数据预测了第 23 周太阳黑子数逐月月均平滑值,预测是第 23 周黑子数月均平滑值的极大值在 2000 年 2 月份出现,值

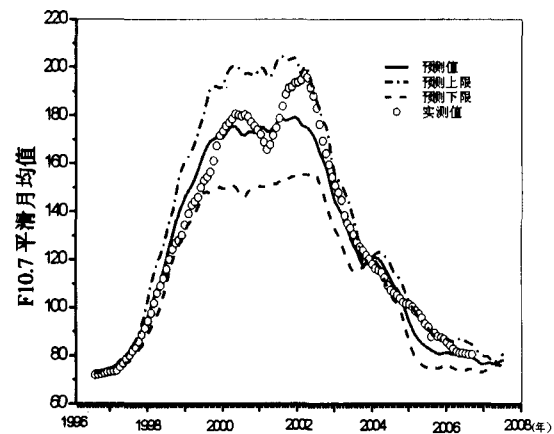
为  $127 \pm 30$ ,之后在大约 20 个月中黑子数缓慢下降,并伴有小的起伏,在 2001 年 10 月出现一个次峰<sup>[26,27]</sup>,实测值表明第一次峰值出现在 2000 年 4 月份,值为 120.8,2001 年的 11 月出现次峰。2002 年,苗娟等<sup>[28]</sup>把“相似周”预报方法推广应用到 10.7cm 射电辐射流量(F10.7)月均平滑值的预报中。

目前第 23 周即将结束,为对本太阳活动周的预报结果进行一个总结,对下一活动周预报提供一种参考,下面我们对“相似周”、NASA 和 ISES(IPS)的预报结果分别从整体形态、误差比较和置信度三个方面对三种预报进行分析评估。

图 1~图 3 分别给出的“相似周”、ISES (IPS)及 NASA 三者预报的第 23 周太阳黑子数和 F10.7 平滑月均与实际观测值的比较,表 2 是三者与实测结果误差的比较。



(1)太阳黑子数



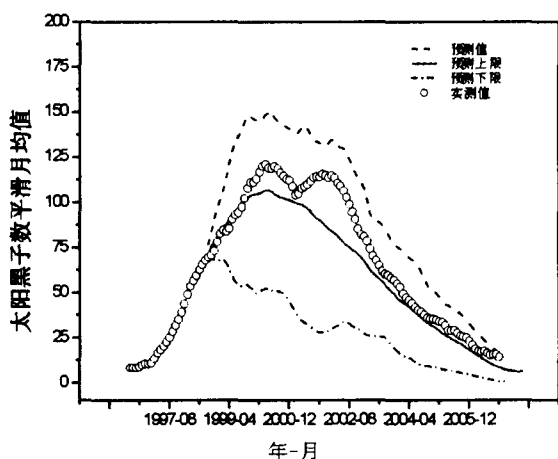
(2)F10.7

图 1 “相似周”方法对第 23 周活动参数预报结果和观测值的比较

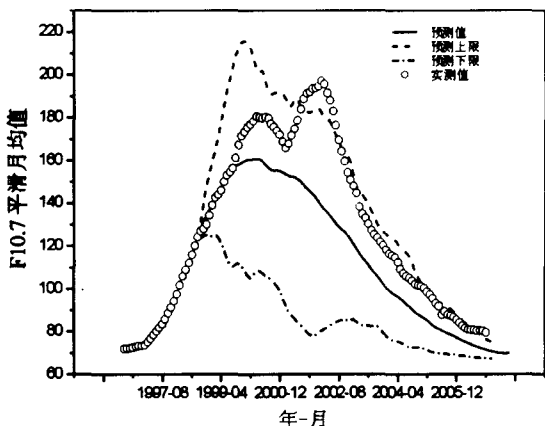
表 2 相似周、NASA、ISES 预报结果与实测值的误差比较

	均方差		
	相似周	NASA	ISES
太阳黑子数	5.46	12.0	12.03
F10.7	7.38	23.66	12.66

由图 1 可以看到,在整体形态上,“相似周”对黑子数的第一个峰值的预测与实测值符合较好(预测 127,观测 120.8),略高于实测值,但次峰的预测偏低;“相似周”对 F10.7 预结果中,体现了双峰结构,但都比实测值稍低。从表 2 给出预报值与观测结果的误差比较来看,“相似周”的误差最小。对于预报置信区间而言,在峰值附近,预报区间较大,“相似周”给出的太阳黑子数和 F10.7 的最大置信区间宽度为 64.53。在所给的置信区间内,太阳黑子数和 F10.7 的预报准确率分别达到 100%,83.7%。



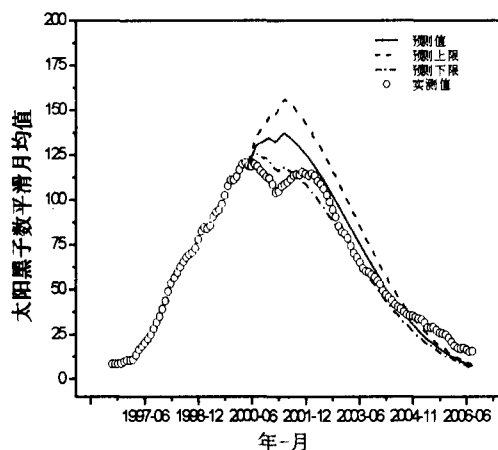
(1)太阳黑子数



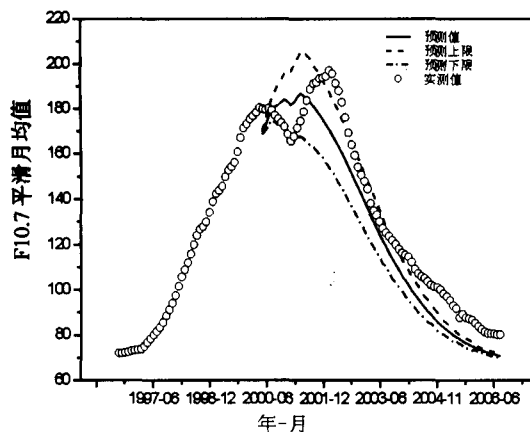
(2)F10.7

图 2 NASA 对第 23 周活动参数预报结果和观测值的比较

由图 2 可以看到,在整体形态上,NASA 对于太阳黑子数和 F10.7 的预报结果都低于实测值(太阳黑子数的预测值为 106),并且没有体现第 23 活动周双峰结构,但预测的出现时间是在 2000 年 5 月份,与实际出现时间接近(实测峰值时间为 4 月)。对于预报置信区间而言,NASA 给出的太阳黑子和 F10.7 的最大置信区间宽度最大,均为 110。虽然在所给的置信区间内,太阳黑子和 F10.7 的预报准确率分别为 100%,80.8%,但从表 2 给出预报值与观测结果的误差比较来看,NASA 的预报误差比较大,太阳黑子的预报误差是“相似周”的 2 倍,F10.7 的误差是“相似周”的 3 倍。



(1)太阳黑子数



(2)F10.7

图 3 ISES 对第 23 周活动参数预报结果和观测值的比较

由图 3 可以看到,在整体形态上,ISES 对于太阳黑子数和 F10.7 峰值的预测与观测数据出现了较大的时间偏差(几乎有 1 年误差),并且太阳黑子数的预测值(137)要高于观测值,也没有体现 23 周的双峰结构。从表 2 给出预报值与观测结果的误差比较

来看,ISES 对太阳黑子的预报误差也是“相似周”的 2 倍。对于预报置信区间而言,ISES 给出的太阳黑子和 F10.7 的最大置信区间宽度最小,均为 38,但在所给的置信区间内,太阳黑子和 F10.7 的预报准确率分别只有 48.7%、22.3%;

综上所述,要评价一种预报结果优劣,应该从整体形态、误差比较、置信区间及预报准确率等方面综合分析。通过与国际空间环境预报权威机构同期发布的预报结果及实测结果相比较,无论是从第 23 周的整体形态、误差比较、还是从预报置信度评估,我们利用“相似周”方法得到的太阳黑子数和 F0.7 的月均平滑值预报结果更接近实测结果。从预报结果的稳定考虑,NASA 和 ISES(IPS)受预报方法的制约,每个月预报结果都会改变一次,这样,距离观测时间越近的结果就比较准确,而时间距离越远的预报结果就很不稳定,有时相差比较的;而“相似周”方法在活动参数确定之后,预报结果稳定,且误差不递推。

#### 4 结果与讨论

通过对太阳活动长期预报方法及第 23 周的预报结果分析,得到:

(1)与大多数预报研究方法相比,“相似周”既可以预报给出峰值及峰值时间,也能给出逐月预报值,同时也适用 F10.7 预报,在太阳活动周长期预报中是一种很有应用价值的预报方法。

(2)从第 23 周的双峰结构来看,NASA 和 ISES(IPS)都没有给出明显的双峰结构预测,“相似周”预测出有双峰出现,虽然预测的次峰值比要实际小。

(3)从第 23 周整个时间剖面来看,NASA 1999 年 3 月所给出的预报结果整体偏低,峰值出现在 2000 年 5 月,值为 106.8;而 ISES(IPS)2000 年 11 月预测峰值出现时间为 2001 年 5 月份,值为 137.3;“相似周”预报的峰值出现在 2000 年 2 月份,值为 128。可以看到,对于峰值及时间的预测,NASA 的时间比较接近,但峰值误差较大,ISES(IPS)的次峰值时间要比实际出现时间晚近 1 年时间,“相似周”峰值时间及峰值与结果接近。通过相同时间段内均方差的比较,可以看到,“相似周”的误差要远远小于其他两种预报结果。

(4)从预报的提前量和稳定性来看,NASA 和 ISES(IPS)都可以提前几年给出后来预报结果,但受预

报方法的制约,在有新的观测值出现时,每个月预报结果都会改变一次,这样,距离观测时间越近的结果就比较准确,而时间距离越远的预报结果就很不稳定,相差比较大。对于“相似周”方法,可以提前好几年甚至一个太阳活动周给出预报结果,且在确定活动参数之后,预报结果稳定,误差不递推。◇

#### 参考文献

- [1]Schove D G,The prediction of solar cycle 23, Annual Geophys, 1983, 1, 391.
- [2]Chistyakov V F,The character of sunspot number cycle 23, Soln. Dann, 1983,1, 97.
- [3]Kontor N N, Lyubimov G P, Pereslegina N V, Khotilovckaya T G, The long-term character of cycle 23 Soln. Dann,1983,11, 74.
- [4]Tritakis V P, Solar Terrestrial Predictions, Proc. Workshop in Meudon, France, NOAA,1986.
- [5]Wilson R M, Geomagnetic precursor method, Geophys. Res. Lett, 1988,15, 125.
- [6]Wilson R M, Bimodality and the hale cycle, Solar Physics, 1988,117, 269.
- [7]Makorov V I, Mikhailutsa V P, The prediction of maximum of cycle 23, Annual Geophys,1991,146.
- [8]Wilson R M,An early estimate for the size of cycle 23, Solar Physics ,1992, 140, 181.
- [9]Rivin Yu R, Cycles of Natural Processes, Dangerous Phenomena, and Ecological Forecasting, Geophys meeting, Moscow, 1992.
- [10]Schatten K H, Pesnell W D, The prediction of cycle 23, Geophys. Res. Lett, 1993, 20, 2275.
- [11]Letfus V, Prediction of the height of solar cycle 23, Solar Physics, 1994, 149, 405.
- [12]Calvo R A, Ceccatto H A, Piacentini R D, Analysis of time serial method, Astrophys. J., 1995,444, 916.
- [13]Jain R,Prediction of the amplitude of sunspot cycle 23, Solar Physics, 1998,176, 431.
- [14]Thompson R J, The estimate of sunspot cycle 23, Solar Physics, 1993,148, 383.
- [15]Bravo S, Stewart G A,Anomalous cosmic-ray helium, nitrogen and oxygen in 1996, : Solar Physics, 1997, 173, 193.
- [16]Bounar K H, Cliver E W, Boriakoff V, The maximum of cycle 23, Solar Physics, 1997,176,211.
- [17]Li Y, Prediction of the features for sunspot cycle 23, Solar Physics, 1997,170, 437.
- [18]Shastri S, An estimate for the size of cycle 23 using multivariate relationships, Solar Physics,1998, 180, 499.
- [19]Wilson R M, Hathaway D H, Reichmann E J, The prediction of cycle 23, Geophys. Res. J., 1998a, 103, 6596.

(下转第 53 页)

但也应注意到, 质子事件尽管都大致具有 3 个阶段的特征, 但不同的太阳活动周的表现形式也不尽相同, 可以看到, 第 23 周与第 20 周的质子事件分布特点有些相似, 即质子事件次数和通量呈现双峰分布, 如果这种周期性确实存在, 那么, 第 24 太阳活动周质子事件的分布将可能沿袭第 21 周的特征, 对此我们将继续观察。如果成例, 则第 24 周的太阳质子事件活动的水平将低于第 23 周。

## 5 结论与讨论

根据最新的第 23 太阳活动周太阳质子事件分布数据, 结合第 21、22 周的数据, 详细分析了太阳质子事件的发生和通量分布特征, 并与常用的太阳质子事件模式进行了对比分析, 发现了它们的一些缺陷。认为:

(1) 太阳质子事件的发生具有很强的随机性, 在目前统计样本不足的情况下用泊松分布进行描述比较合适, 但应注意到太阳活动的阶段性特征;

(2) 根据最近 3 个太阳活动周的太阳质子事件观测数据的统计分析, 将一个太阳活动周中太阳质子事件的分布划分为 3 个时间段, 即上升段、峰值段和下降段, 并对不同阶段的太阳质子事件分布规律和特征进行了总结。

通过对 23 周的对比分析认为, 太阳质子事件的 3 个阶段的划分比较适合对质子事件发生特征进行描述。

目前, 正在进行质子事件分布规律的深入研究, 针对三个不同的阶段将我们的定性描述, 转化成定量的计算规则, 并在数据分析的基础上, 提取

出质子事件分布的模式参数, 并最终建立完整的太阳高能质子分布长期预报模式, 可以针对不同类型的卫星任务, 为用户提供太阳高能质子辐射环境的背景参数。◇

## 参 考 文 献

- [1] Adams J, R Silberberg, and C H Chao. Cosmic ray effects on microelectronics, Part I: The near-earth particle environment. NRL Memorandum Report 4506, 25 August 1981.
- [2] King J H. Solar proton fluences for 1977-1983 Space Missions. *Spacecraft and Rockets*, 11(6), 401, 1974.
- [3] Feynman J, T P Armstrong, L Dao-Gibner, S Silberman. Solar proton events during solar cycles 19, 20, and 21. *Solar Physics*, 126; 385-400, 1990a.
- [4] Feynman J, T P Armstrong, L Dao-Gibner, S Silberman. New interplanetary proton fluence model. *Spacecraft*, 27, 403-410, 1990b.
- [5] Feynman J, G Spitale, J Wang, S Gabriel. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991. *JGR* 98, A8, 13281-13294, 1993.
- [6] Nymmik R A. The main characteristics of the solar energetic particle events relevant to the solar activity. *Proc. of the 27th ICRC*, 8, 3197-3200, 2001.
- [7] Nymmik R A. Probabilistic model for fluences and peak fluxes of solar energetic particles. *Rad. Meas*, 30, 298-296, 1999a.
- [8] Nymmik R A. Averaged Energy Spectra of Peak Flux and Fluence Values in Solar Cosmic Ray Events. *Proc. 23rd ICRC, Calgary*, 3, 29-32, 1993.
- [9] Nymmik R A. Behavioural Features of Energy Spectra of Particle Fluences and Peak Fluxes in Solar Cosmic Rays. *Proc. 24th ICRC, Roma*, 3, 66-69, 1995.
- [10] Nymmik R A. Relationships among solar activity, SEP occurrence frequency, and solar energetic particle event distribution function. *Proc. of the 26th ICRC*, 6, 280-183, 1999b.
- [11] Wang Jialong, Han Yanben. Forecasts of smoothed and non-smoothed monthly mean sunspot numbers for solar cycle 23. *Solar Physics*, 2001, 202, 395.
- [12] Wang Jialong, Han Yanben. Forecasts of smoothed and non-smoothed monthly mean sunspot numbers for solar cycle 23. *Atrophys. Rep.*, 1997, 261-272.
- [13] Wang J L, Han Y B. Similar cycle method and a discussion of prediction monthly sunspot number for cycle 23. *Ch.J.A.A.*, 2000, 20(3), 278, in Chinese(王家龙, 韩延本, “相似周”方法及对第 23 周太阳黑子数逐月预测的讨论, *空间科学学报*, 2000, 20(3), 278).
- [14] Miao J, Liu S Q. Primary research on prediction method of 10.7cm solar radio flux. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, 23(1):50-54. in Chinese(苗娟, 刘四清等, 太阳 10.7cm 射电辐射流量预报方法初探, *空间科学学报*, 2003, 23(1), 50-54).
- [15] Wilson R M, Hathaway D H, Reichmann E J. The prediction of cycle 23, 1998b. *NASA/TP-1998-208591*.
- [16] Rangarajan G K. The estimate of cycle 23 by time-serial method. *Earth Planet Space*, 1998, 50, 91.
- [17] Kane R P. Predictions of the sunspot maximum of solar cycle 23 extrapolation of spectral components. *Solar Physics*, 1999, 189, 217.
- [18] Ahluwalia H S. Prediction of height of cycle 23 using geomagnetic precursor method. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103, 12103.
- [19] Hathaway D H, Wilson R M, Reichmann E J. A synthesis of solar cycle prediction techniques. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104, 22 375.
- [20] Kane R P. Did prediction of the maximum sunspot number for solar cycle 23 come true. *Solar Physics*, 2001, 202, 395.
- [21] Wang Jialong, Han Yanben. Forecasts of smoothed and non-smoothed monthly mean sunspot numbers for solar cycle 23. *Atrophys. Rep.*, 1997, 261-272.
- [22] Wang J L, Han Y B. Similar cycle method and a discussion of prediction monthly sunspot number for cycle 23. *Ch.J.A.A.*, 2000, 20(3), 278, in Chinese(王家龙, 韩延本, “相似周”方法及对第 23 周太阳黑子数逐月预测的讨论, *空间科学学报*, 2000, 20(3), 278).
- [23] Miao J, Liu S Q. Primary research on prediction method of 10.7cm solar radio flux. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, 23(1):50-54. in Chinese(苗娟, 刘四清等, 太阳 10.7cm 射电辐射流量预报方法初探, *空间科学学报*, 2003, 23(1), 50-54).

(上接第 58 页)

- [20] Wilson R M, Hathaway D H, Reichmann E J. The prediction of cycle 23, 1998b. *NASA/TP-1998-208591*.
- [21] Rangarajan G K. The estimate of cycle 23 by time-serial method. *Earth Planet Space*, 1998, 50, 91.
- [22] Kane R P. Predictions of the sunspot maximum of solar cycle 23 extrapolation of spectral components. *Solar Physics*, 1999, 189, 217.
- [23] Ahluwalia H S. Prediction of height of cycle 23 using geomagnetic precursor method. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103, 12103.
- [24] Hathaway D H, Wilson R M, Reichmann E J. A synthesis of solar cycle prediction techniques. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104, 22 375.
- [25] Kane R P. Did prediction of the maximum sunspot number for solar cycle 23 come true. *Solar Physics*, 2001, 202, 395.