

太阳质子事件长期预报方法研究

薛炳森 叶宗海

(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘要 太阳质子事件是对航天活动构成威胁的重要空间辐射环境事件, 质子事件的长期预报对航天器防辐射设计具有重要的指导意义。通过分析最近的 23 太阳活动周数据, 并对比 21 和 22 周相关资料, 总结出了太阳质子事件分布的三段式特征, 即质子事件与太阳活动周同步, 呈 11 年周期变化, 每一个周期中又可以划分为: 上升期 (前 4 年)、峰值期 (中间 4 年) 和下降期 (最后 3 年), 同时对每一个阶段的质子事件分布特征进行详细描述。在此基础上, 对第 24 周的质子事件分布状况进行预测。

关键词 太阳活动 质子事件 长期预报

1 概述

太阳质子事件是指在近地轨道观测到明显的质子通量增长, 在地球同步轨道没有质子事件时通常为宇宙线背景, $E > 10\text{MeV}$ 的质子通量为 0.01pfu 左右, 根据 NOAA-SEC 制定的标准, 当质子通量超过 10pfu , 并持续 15 分钟以上者计为一次质子事件。但这种定义方法也有一定的争议, 如图 1 所示, 图中上

半部分显示的是 1989 年 10 月 19 日开始的质子事件, 该过程持续了近 10 天, 尽管该次事件中包含了 4 次耀斑伴随的质子事件, 但仍认定为一次质子事件。我们认为这种认定规则是可行的, 因为从最近 3 个太阳活动周的观测来看, 一次质子事件都是来自一个活动区, 包括我们上面提到的例子, 这样处理使质子事件的边界更加清楚, 而且, 这样划分在计算质子事件效应时的影响不大。

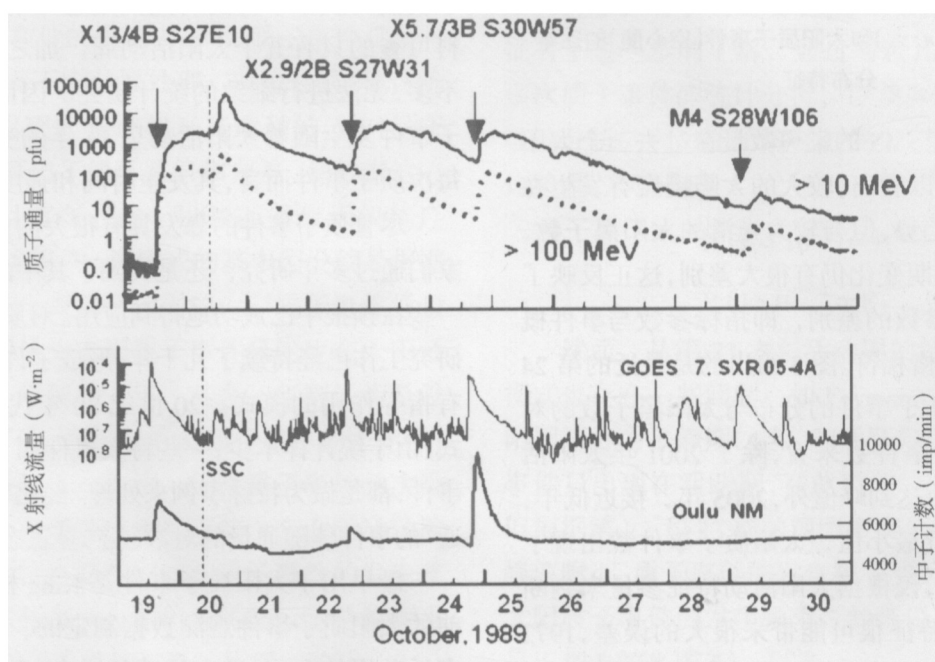


图 1 太阳耀斑及其伴随的质子事件对应特征

从图 1 中可以看出, 每一次质子通量的增长都对应着下半部分给出的太阳耀斑(上面的曲线), 这正是早期的质子事件耀斑直接加速的论据。20 世纪 90 年代以来, CME 加速高能质子的理论逐渐占据上风, 这种理论实用性更广, 对质子事件的时间和通量演化形态的解释也更加合理。但 CME 的实时监测仍存在着不少困难, 而且, CME 只是一次太阳爆发活动的一个方面, 太阳爆发是一种综合的爆发事件, 物质喷发和电磁爆发同时存在, 不同形式的爆发强度基本呈正相关, 而能够加速出足够通量的高能质子的 CME 已达到一定规模, 这时就会对应着比较显著的太阳耀斑, 图 2 显示的是 1975-2005 年间耀斑的时间及纬度分布(实心点)以及伴随有质子事件的耀斑分布, 可以大致地认为, 质子事件与耀斑的发生率呈正相关。

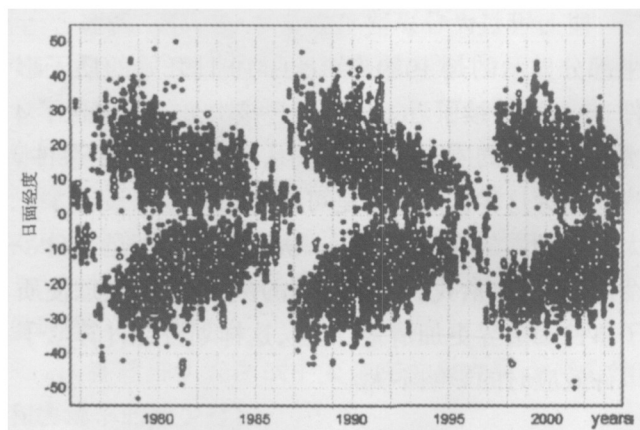


图 2 太阳耀斑(实心点)和太阳质子事件(空心圈)的逐年分布特征

图 2 显示的是 >M5 的耀斑数量在过去三个太阳活动周的分布, 可以看出, 较大的太阳耀斑有发生在太阳活动高年的趋势, 但与较为光滑的太阳黑子数、F10.7 流量等长周期变化仍有很大差别, 这正反映了事件分布与指标参数的差别, 即指标参数与事件概率相关, 但并不严格相符。图 3 给出的是最近的第 24 太阳活动周太阳质子事件的分布与太阳黑子数的对应关系, 仅就质子事件数来看, 除了 2001 年太阳活动峰年质子事件数达到峰值外, 2005 年, 接近低年, 太阳黑子数也接近最小值, 太阳质子事件数出现了第二个峰值, 因此, 仅根据太阳活动特征参量来判断质子事件的发生特征很可能带来很大的误差, 1972 年 8 月的特大太阳质子事件时有一个例子, 当时太

阳活动已接近低年, 但该次质子事件规模却超过了以往的质子事件, 并在以后的 10 多年时间里作为极端太阳质子事件的标准^[1]。

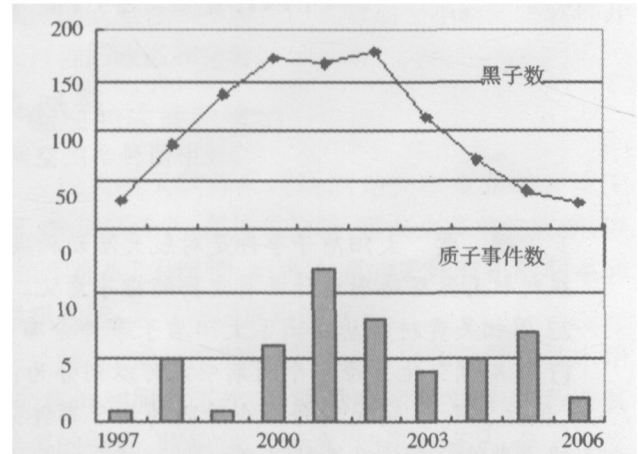


图 3 第 24 太阳活动周质子事件与太阳黑子数的对应特征

2 现有质子事件长期预报模式分析

太阳质子事件是日面上发生的能量释放过程。因而它的出现率与太阳的活动水平密切相关。通常, 太阳黑子数反映着太阳活动水平的高低, 我们看到在太阳活动峰年附近, 也是质子事件密度较大的时期, 每年多达 10 次。而在谷年期则一次也没有, 但也有例外, 如 1980 年, 正值黑子数峰年, 但质子事件仅为 2 次。另外, 强活动区的质子事件有重复暴发的倾向, 因而峰年期间质子事件的分布也不均匀。另外, 由于我们对质子事件的研究只是近几十年的事, 有资料可查的只有五个太阳活动周, 加之记录到的事件不多, 无法进行细致的统计研究。因而我们认为, 质子事件发生随着太阳活动呈 11 年的变化周期, 但就每次质子事件而言, 其发生时间和强度是随机的。

尽管质子事件的暴发具有很大的偶然性, 但科学家们通过多年研究, 还是找到了其中的一些规律, 有一些在预报中已成功地得到应用。对质子事件特征的研究工作已经持续了几十年, 形成了许多对航天活动有指导作用的模式。20 世纪 80 年代中期以前的模式, 由于统计样本少, 一些特大事件如 1972 年 8 月的事件, 都是做为特殊事例来处理。经比较发现那些“普通”的事件伴随通量的对数($\lg F$)呈正态分布^[2]。

最早用于太阳质子事件是 King 根据 1980 年以前的太阳质子事件观测数据制定的, 由于只有一个多活动周的观测, 没有足够的样本, 无法进行统计分

析。King 根据当时的有限数据给出了几种档次的太阳质子事件能谱,如图 4 所示,图中标有 Fm 表示一般太阳质子事件的平均能谱;Fw 表示 90%置信度下的恶劣太阳质子事件能谱,即在各种能量中,90%的事件不会超过该值;Fa 则是参照 1972 年特大质子事件给出的极端状况。

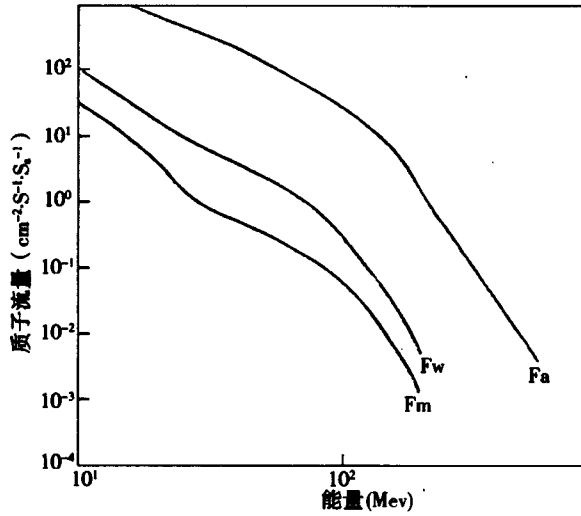


图 4 普通(Fm)最坏(Fw)和特殊(Fa) 质子事件微分通量谱的比较

Feymann^{[3][4][5]}通过折算加入了 1954~1960 年的数据,并考虑了 20 世纪 80 年代后期的资料,对四个太阳活动周的数据进行了整理、分析,得到了与 King 相似的结论。不过,他的统计包含了 1972 年和 1989 年等特大事件。在他的模式中,特大质子事件只是一种小概率事件,而不应单独处理。通过计算,他认为太阳质子事件出现的概率相对其通量的(lgF)呈正态分布,并且计算出了最可几值和方差。他根据这一思想发展出了目前在 NASA 和 ESA 等航天机构广泛采用的 JPL-91 模式。该模式的基本假设就是根据图 5 给出的前 3 个太阳活动周的太阳质子事件通量的分布特性,即认为太阳质子事件只发生在太阳活动峰值年的前 3 年到后 4 年,其余 4 年则认为是没有质子事件的年份,见图 5。在有质子事件的 7 年中,认为质子事件是随机发生的,每年质子事件的次数呈泊松分布,分布函数的参数由前 3 个太阳活动周的质子事件发生特点确定。太阳质子事件的发生率随总通量呈正态分布,分布函数的参数也是根据当时可以得到的质子事件能谱经计算得出的。

但这种假设在 22 周下半段和 23 周证明是存在很大误差的,在太阳活动相对较低的年份,即 Feymann 理论中没有质子事件发生的时间段,特别是太阳活动的下降段,质子事件发生频率和年累计质子通量都有可能很高,有的甚至超过了太阳活动高年,2004 年和 2005 年就是很好的例证,在 Feymann 假设中,这两年应该是没有质子事件发生的年份,但发生了多次较大的事件。

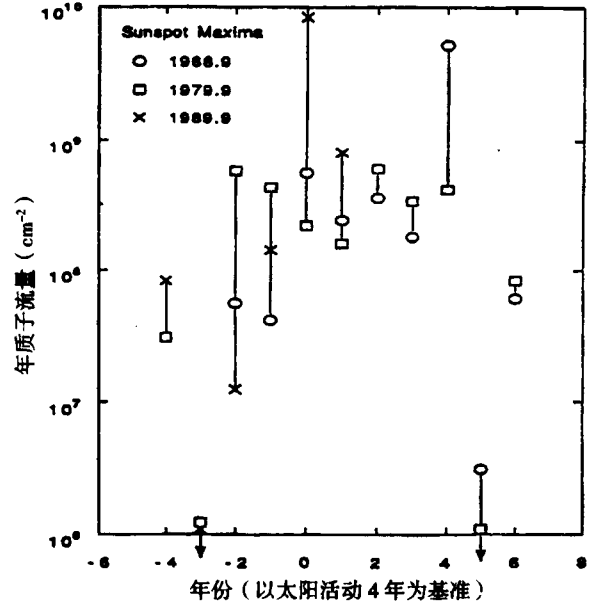


图 5 第 19-21 活动周太阳质子事件通量的年分布特征^[4]

随着太阳质子事件数据样本的增加以及探测技术的进步,对于太阳质子事件的时间分布和能谱特征有了进一步的了解,通过对近几个太阳周的 200 多次质子事件的统计分析,以及对用地球岩石放射性的分析,得出质子事件的发生频率和其流量呈反比关系,其公式为

$$\begin{aligned}
 P_i(F \leq 10^{10}) &\propto F^{-0.4} \\
 P_i(F > 10^{10}) &\propto F^{-0.9}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

然而,从第 23 太阳活动周的结果来看,JPL-91 模式也存在一些问题,如 Feymann 简单地将一个太阳周划分为平静期(4 年)和活跃期(7 年),规定质子事件只出现在活跃期,在此期间,出现频率为常数。但根据第 22 和 23 周的观测事实证明,太阳黑子数峰值附近,质子事件的发生频率要远高于其他时段,太阳质子事件的发生频率总的来说与太阳黑子数是呈正相关的^[6](图 6)。

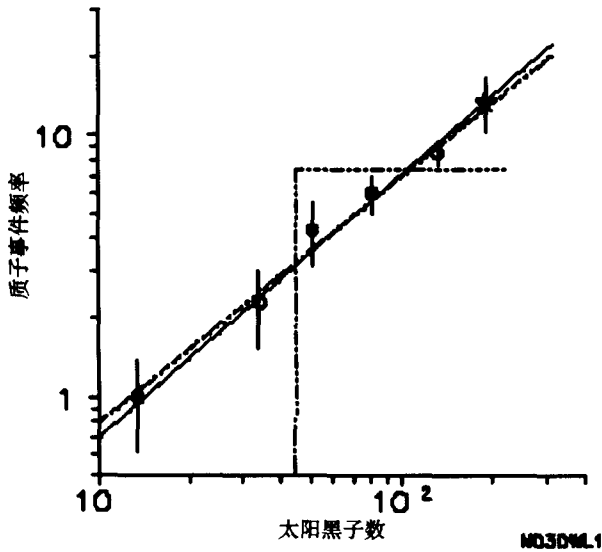


图 6 太阳质子事件频率与黑子数的统计关系

太阳质子事件的出现频率与其总通量呈负相关,这一趋势由图 7 可以明显地看出。Nymmik 也认为特定质子事件的发生时间是随机的^[7],但质子事件的发生概率与其总通量存在一定关系。统计公式表示为:

$$P(\Phi) = C \cdot \Phi^{-1.41} \quad (2)$$

式中 Φ 为质子事件总通量。

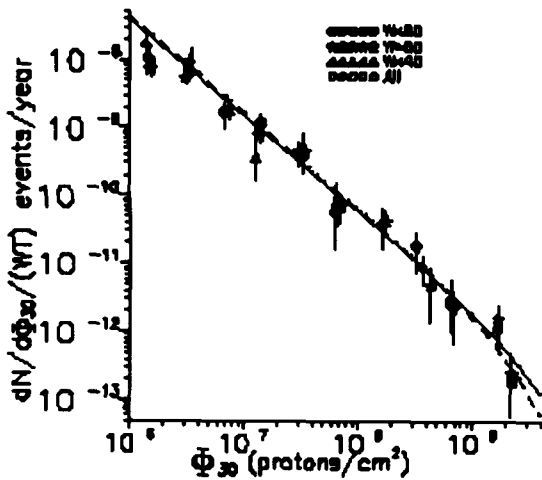


图 7 质子事件数量与通量的关系

根据 Nymmik 的理论研究结果,可以建立太阳质子事件统计模式,可以用来计算各种太阳活动水平条件下太阳质子事件高能质子的总通量、能谱、峰值通量等特征参数,同时还能对 $2 \leq Z \leq 28$ 的重粒子的通量增长进行估算^{[8][9][10]}。

利用 Nymmik 的模式不仅可以计算不同太阳活

动水平时的太阳质子事件的通量,还可以计算不同置信度时的太阳质子事件的能谱。

Nymmik 的理论加入了太阳活动指标来调制太阳质子事件的频率和能谱的预测,并且打破了 Feymann 的质子事件发生时段和平静时段的划分,从第 23 太阳活动周的观测事实来看,Nymmik 的太阳质子事件分布更加符合实际,这当然也与质子事件数量的增加,特别是质子事件信息量的增加有密切的关系。

但 Nymmik 尽管对质子事件的长期预测模式作了很大的改进,但仍有一些不足之处值得商榷。其中,首先就是在处理质子事件发生率与太阳黑子数的关系时,只采用了一个简单的解析关系,即

$$\overline{v(t)} = 0.3 \times \overline{W(t)}^{0.75} \quad (\text{次/年}) \quad (3)$$

式中 $\overline{v(t)}$ —事件大小为 10^5 个质子/cm² 的太阳质子事件的发生的频率; $\overline{W(t)}$ —12 个月平均的太阳黑子数。

可以看出,质子事件发生率 $\overline{v(t)}$ 与太阳黑子数 $\overline{W(t)}$ 呈正相关,但至少在第 21 周太阳活动峰年和第 23 周太阳活动低年存在较大的出入。

其次,Nymmik 的模式中没有考虑太阳活动周中质子事件发生率和通量水平分布的细节,后面我们将看到,在太阳黑子数相等的条件下,质子事件的次数和通量水平会有很大差别,主要表现在太阳活动周的上升段和下降段。

为此,我们在分析最新的太阳质子事件数据的基础上,提出了对质子事件活动阶段的划分方法,从而有效地提高太阳质子事件长期预报的准确性。

3 根据最新数据的统计结果

根据前面的分析,太阳质子事件与日面上的爆发活动密切相关,而爆发活动的频率与太阳活动指标参数大致呈正相关。但是,太阳活动的表征参数,如太阳黑子数、F10.7 流量等,都是将太阳作为一个整体来看待。而产生质子事件的爆发活动通常与太阳局部的活动区的能量积累有关。

太阳活动周期的形成总的来说与太阳大气的较差自转引起的大范围的太阳磁场磁力线的缠绕有关,在一个太阳活动周要经历缠绕、爆发崩溃和恢复阶段,对应着太阳活动的上升期、峰值期和下

降期。

在太阳磁场磁力线缠绕过程中,会在一些区域出现不均匀的结构,并不断发展,在这个位置积蓄磁能,当达到以地阈值并满足一定条件时,极会产生爆发活动并伴有高能质子,形成地球附近的太阳质子事件。在太阳活动上升期,磁场的缠绕形成的复杂结构从无到有,因而形成足以产生质子事件的复杂结构的可能性较小。在太阳磁场缠绕达到很高的水平时,不断有磁力线缠绕形成的复杂结构出现,爆发活动也非常频繁。而太阳活动水平开始下降时,尽管太阳表面磁场结构总的趋势是下降,但在复杂缠绕的磁力线重联和崩溃过程中,仍会形成一些复杂结构,并引起暴发事件的增加,此时的事件数要多于上升

期。因此,尽管总的太阳活动指标上升段和下降段相近,但爆发活动的分布却有着很大差别,至少对于质子事件来说是如此。

综上所述,为了更好地描述太阳质子事件的分布规律,我们在分析总结前人的理论研究成果的基础上,分析了第 23 周质子事件分布的特征,我们根据太阳质子事件每年发生的次数及每年的累计通量,将一个太阳活动周分为上升期、峰值期和下降期三个阶段,对应的时段自太阳活动最小年开始,分别对应着第 1-4 年—上升期;第 5-8 年—峰值期;第 9-11 年—下降期。表 1 和表 2 中分别给出了第 21、22 和 23 太阳活动周不同时期所对应的质子事件数和年质子流量的数值。

表 1 太阳质子事件在各活动周中的分布

年份	上升期				峰值期				下降期		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21		1	2	2	9	7	3	7	10	2	5
22	3	2		3	14	7	9	5	1	1	
23		1	5	1	6	12	8	4	5	7	2
合计	3	4	7	6	29	26	21	16	16	10	7
阶段统计	20				91				33		

表 2 太阳质子事件流量的分布特征

年份	上升期				峰值期				下降期		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21		6.6E6	1.1E8	7.1E8	5.6E9	1.9E9	1.5E8	3.3E9	4.1E9	1.2E8	1.5E9
22	3.7E8	4.1E8		2.1E7	1.6E10	1.5E9	1.4E10	1.2E9	1.2E7	2.5E9	
23			2.2E8		2.2E9	2.7E9	1.7E8	1.4E9	2.7E7	5.5E8	2.0E8
合计	3.7E8	4.2E8	3.3E8	7.1E8	2.4E10	5.1E9	1.4E10	5.9E9	4.1E9	3.2E9	1.9E9
	1.6E9				4.9E10				9.0E9		

在划分三个阶段除了前面提到的对太阳质子事件发生规律的认识外,主要还是依据较大规模的太阳质子事件的次数(以总通量作为标准),以及一年内的质子事件的积分流量作为综合判断的标准。其中,前者与卫星可能遭遇到单粒子事件的发生率有关,而后者则决定着卫星关键部件的总剂量效应水平。

从上面两个表中,表 1 中我们可以发现,在最近的 3 个太阳活动周中,由于探测技术的进步,质子事件的分布与 Feymann 给出的两段式分布有了很大差

距,尽管太阳质子事件在太阳活动低年比较稀少,但并非没有,从表 2 可以看到,即使是在太阳活动的小年,如 1984 年,仍然可能出现较高的质子通量,这样,对于运行在太阳活动上升期的时间较短的卫星任务,就会造成辐射环境估计不足。再看太阳活动下降期,出现较大规模的质子事件的可能性仍然很高,但随机性更强,从表 1 和表 2 中可以看到,在太阳活动下降期,无论是太阳质子事件的时间分布还是通量分布,都没有固定的规律。而如果遵循 Feymann 的法则,那末,1984、1994 和 2005 年的质子事件将被忽

略,这对于在这些年短期运行的卫星的防辐射设计是非常不利的。通过数据统计分析认为,在太阳活动高年, Feymann 理论是比较适用的,即质子事件符合泊松分布,但由于增加了大量的探测数据,他所得到的分布参数需要更新。

而 Nymmik 的对太阳质子事件的分布规律的描述则机械地遵循着与太阳黑子数的固定对应关系,首先,从前面的讨论及表 1 和表 2 中的数据可以看出,对于太阳活动上升段和下降段,可以出现相同的太阳黑子数,而这两个阶段无论是质子事件的发生率以及质子事件的通量都有着很大的区别。其次,在太阳活动高年的质子事件的分布,用简单的解析式来描述是不合适的,特别是对于不同的太阳活动周,通过数据统计分析,发现太阳活动高年质子事件的分布用泊松分布更为合适。运用 Nimmik 理论的过程中也发现,他的统计结果在描述质子事件的通量分布以及能谱参数与质子通量方面还是比较成功的,但是,由于相对于他的工作,质子事件统计样本增加了一个太阳活动周,因此,在编制新的太阳质子事件长期分布模式时,其中的参数需要进行调整。

综上所述,主要分析了最近 3 个太阳活动周的质子事件的分布情况,将一个太阳活动周中质子事件的统计区域分为 3 个:

(1) 上升期(第 1-4 年),特点是质子事件较为稀少,分布没有规律,质子通量一般较小,这与上升期太阳表面磁场较弱有关;不发生大的质子事件。

(2) 峰值期(第 5-8 年),特点是每年都有多次质子事件发生,年通量较大,差别较小。容易产生大的质子事件,通量大的事件的分布均匀。

(3) 下降期(第 9-11 年),特点是质子事件的分布差异加大,通量的变化幅度也很大,可能出现高通量的事件,有时可能超过峰年。如典型的 1972 年 8 月的特大事件。

表 3 详细地列出了第 23 太阳活动周质子事件的分布情况及其与之对应的太阳黑子数,比较符合给出的三个阶段的划分。

从质子事件数量分析,可以看出,三个时期所占比例分别是:14%(20/144)、63(91/144)和 23(33/144)。通量比为:1:30:5。比较符合划分规则。

表 3 太阳质子事件的发生次数及年通量随黑子数的变化

年份	黑子数	质子事件数	年质子通量
1996	30	0	
1997	29	1	3.09e7
1998	85	5	2.24e8
1999	136	1	7.23e6
2000	172	6	2.17e9
2001	167	12	2.65e9
2002	179	8	1.74e8
2003	113	4	1.42e9
2004	70	5	2.72e7
2005	40	7	5.46e8
2006	28	2	2.01e8
2007	27(估计)	0	

4 对第 24 太阳活动周质子事件分布预测

根据对第 21-23 太阳活动周的总结和对一个太阳活动周内不同质子事件阶段的划分,对 24 太阳活动周(2008-2019 年)质子事件的可能的分布状况进行了预测。

第 24 太阳活动周质子事件分布可分为 3 个阶段,上升期(2008-2011 年)、峰值期(2012-2015 年)和下降期(2016-2018 年)。

第 24 太阳活动周质子事件上升期的特点是:质子事件较为稀少,多为一次性的活动区产生,持续时间不长,总通量和峰值通量均不大。年平均质子事件 1.8 次,最多可能达到 5 次;年平均质子通量 $1.0 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$,最大年通量 $7 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$,质子事件峰值通量不超过 500pfu。

第 24 太阳活动周质子事件峰值期的特点是:质子事件密度较高,年均 7.8 次,质子事件峰值通量相对较高,持续时间长,单次质子事件总通量较高。峰值期间年均质子通量可达 $4 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$,最高可达 10^{10}cm^{-2} ,最大通量可达 10^4pfu ,在峰值期的 4 年均可能出现。

第 24 太阳活动周质子事件下降期的特点是:每年的质子事件数、总通量、峰值通量的变化范围会很大,平均每年质子事件数为 2.8 次,可能达到 8-9 次,出现在下降期的前半期;但此质子事件的总通量平均值可达 $8 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$,最大可达 $4 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$,质子事件的峰值通量最高可达 10000pfu。

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.