0254-6124/2010/30(3)-205–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Tingting, Shi Liqin, Liu Siqing. Research on the solar proton fluence model. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(3): 205-210

太阳质子通量模型研究 *

李婷婷[1,2] 师立勤[1] 刘四清[1]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

[2](中国科学院研究生院)

摘 要 太阳质子事件对航天活动构成重要威胁, 预测一定时期内太阳质子通量对航天器抗辐射加固设计有重要的指导意义. 在第 20 至 23 太阳活动周的太阳质子事件数据统计分析的基础上, 建立了一个针对 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 和 $E > 30\,\mathrm{MeV}$ 太阳质子通量的新模型. 新模型与目前航天工程中常用的 JPL 模型相比较, 引入了太阳活动性对质子事件发生概率的影响因素, 能够评估不同太阳活动水平下的质子通量, 其结果更符合质子事件的分布特征.

关键词 太阳质子事件; 质子通量; 预报模型

中图法分类号 P 353

Research on the Solar Proton Fluence Model

LI Tingting[1,2] SHI Liqin[1] LIU Siqing[1]

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

[2](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Solar Proton Event (SPE) has great influence on the human space activities. Establishing prediction model for total fluence of solar protons accumulated during a mission and taking protective measures are of vital significance for the security of the spacecraft and astronauts. Based on a data set of proton events from the last four solar cycles, a new statistical model is designed to predict the proton fluence for space mission analysis. The energy ranges considered are $E > 10\,\mathrm{MeV}$ and $E > 30\,\mathrm{MeV}$, respectively. Because of the quasi-random nature of the occurrences, and spectra of SPE, solar proton mission fluence must be treated statistically. The purpose of this analysis is to derive the probability of exceeding various proton fluence as a function of proton energy and mission duration. Compared with commonly used JPL model, solar activity levels are taken into account to obtain the occurrence probability of proton events. The new model can access proton fluence in different phase, and is more consistent with the distribution of proton events.

Key words Solar Proton Event (SPE), Solar proton fluence, Prediction model

* 国家重点基础研究发展规划项目 (G2005CB806300) 和中国科学院知识创新工程共同资助

2009-04-27 收到原稿, 2009-11-24 收到修定稿

E-mail: gaiasmile@gmail.com

1 引言

伴随太阳耀斑等太阳剧烈活动而喷发的太阳高能粒子经行星际传播到达地球轨道附近后, 引起地球轨道附近的高能粒子强度突然增加的事件称为太阳高能粒子事件. 由于高能粒子中绝大部分都是质子, 占高能粒子总数的 90% 以上, 所以通常把太阳高能粒子事件称为太阳质子事件.

太阳质子事件引起的高能辐射环境增强对航天器和宇航员的安全构成威胁. 因此, 准确预测航天器飞行任务期间可能遭遇的太阳质子通量, 对航天器的抗辐射加固设计具有重要指导意义. 太阳质子通量模型是计算未来某一段时间内, 太阳质子事件累积通量超过某一给定值可能性的模型, 是航天器设计阶段评估飞行任务期间太阳质子通量的工具.

最早的太阳质子通量模型是 King 模型 [1]. 该模型只采用了第 20 太阳活动周活跃年份 (1966—1972 年) 的数据, 模型中假设太阳黑子数和年均累积太阳质子通量呈线性相关, 并对 1972 年的大事件进行了单独处理. 由于 King 模型的统计数据较少, 并且模型的假设存在一定疑问, Feynman 等 [2−3] 在 King 模型方法的基础上, 开发了 JPL 模型. JPL 模型是目前航天工程中最广泛使用的太阳质子通量模型. 其采用了 1963—1991 年近三个太阳活动周的太阳质子事件数据. 在统计分析的基础上, 模型中应用了以下假设: ①单个太阳质子事件的发生是随机的, 事件的爆发概率服从泊松统计分布; ②质子事件的通量服从对数正态分布; ③太阳质子事件只发生在太阳活动周连续 7 个活跃年, 即太阳活动极大年的前 2.5 年到后 4.5 年, 忽略 4 个平静年份的太阳质子事件; ④不同太阳活跃年份的质子事件爆发频率是一致的.

虽然 JPL 模型对质子通量的预测取得了较好的效果, 但仍存在一定问题, 如简单地规定太阳质子事件只出现在太阳活跃年, 且出现频率为常数等. 根据 22 和 23 周的观测事实, 虽然平静期年份太阳质子事件很稀少, 但并不能被忽略, 例如 2005 年 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量超过 $10^7\,\mathrm{cm}^{-2}$ 的事件就有 7 次, 更为有效的模型应该能计算太阳活跃年份和平静年份的太阳质子通量. 同时, 观测事实也证明, 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体来说与太阳黑子数是正相关的 [4], 所以对不同太阳活跃年份质子事件的发生频率也应该有所区别. 另外, 对于建立在数据统计基础上的太阳质子通量模型, 统计样本的多少, 对模型的精确性也有一定影响. 随着 23 太阳活动周的结束, 有了更多质子事件数据可供分析, 为模型的改进提供了条件.

通过对第 20 至 23 共 4 个太阳活动周的太阳质子事件数据进行统计分析, 在 JPL 模型方法的基础上, 引入了太阳活动性对质子事件发生概率的影响因素, 建立了一个针对 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 和 $E > 30\,\mathrm{MeV}$ 太阳质子通量的新模型.

2 数据处理和统计分析

目前, 只有 5 个太阳活动周的太阳质子事件资料. 由于 1963 年以前的数据主要是火箭和热气球数据, 误差较大, 因此选择了第 20 至 23 这 4 个太阳活动周 (1964—2007 年) 的数据进行统计分析. 其中第 20 至 21 太阳活动周与 JPL 模型一致, 数据来自于 IMP 系列卫星的观测 [5], 第 22 至 23 周数据来自于 GOES 系列卫星的观测*, 具体数据列于表 1.

表 1 太阳质子事件数据来源

Table 1 Data source for the solar proton events

太阳活动周	开始年	结束年	所采用的数据卫星
20	1964	1974	IMP-3, 4, 5, 7, 8
21	1975	1985	IMP-7, 8
22	1986	1996	GOES-6, 7, 8
23	1997	2007	GOES-8, 10, 11

在数据处理中, 通过质子事件通量的阈值确定质子事件发生的始末. 对于 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 的质子数据, 按照国际上公认的标准, 以连续 15 min 以上的时间通量超过 10 pfu 作为事件定义标准. 对于 $E > 30\,\mathrm{MeV}$ 的质子数据, 以连续 15 min 以上的时间通量超过 1 pfu 作为事件定义标准. 在实际的数据中, 依此判断小事件会有很多. 考虑小事件对总通量的贡献很小, 在实际处理中, 对于 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 的质子数据, 事件选取标准是累积通量大于 $10^7\,\mathrm{cm}^{-2}$; 对于 $E > 30\,\mathrm{MeV}$ 的质子数据, 事件选取标准是累积通量大于 $10^6\,\mathrm{cm}^{-2}$. 对于连续多次耀斑爆发所伴随的

*http://goes.ngdc.noaa.gov/data/

质子事件, 只要中间下降没有低于质子事件阈值, 就认为其是一次质子事件. 这种事件中可能包含多次通量的上升和下降. 例如 1989 年 10 月 19 日开始的质子事件, 持续了近 10 天.

按照 Yucker[6] 和 King[1] 的方法, 比较了质子事件通量分布与对数正态分布的关系. 图 1 和图 2 分别显示了 1964 至 2007 年 4 个太阳活动周期间 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 和 $E > 30\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子事件累积通量的分布. 图中纵轴是对数坐标下的事件通量, 横轴是正态分布坐标下事件样本中通量小于给定值的比例, 也就是事件通量与 $(i \times 100)/(n+1)$ 的关系, i 为某一事件在样本中所有事件从最小到最大排序中的排序数, n 为事件总数. 如果事件的通量分布符合对数正态分布, 图中的数据将分布在一条直线上. 从图中可以看出, 多数数据分布在一条直线上, 但对于通量很低的事件, 数据分布与直线发生明显偏离, 其通量值高于直线的预测. 这说明中等以上质子事件的通量很好地符合对数正态分布, 但对于通量很低的事件, 对数正态分布将低估事件的通量. 但对于一般空间任务的时间跨度而言, 小事件的通量对质子事件总通量的贡献很小, 可以忽略.

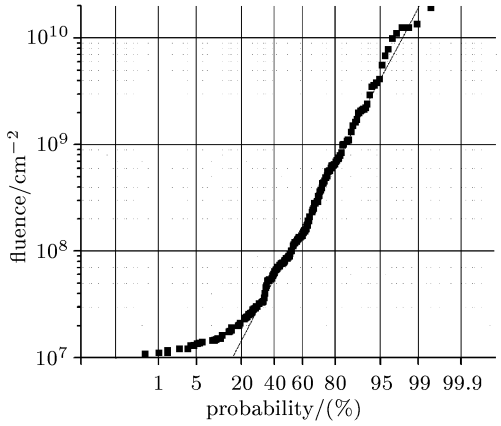


图 1 第 20 至第 23 太阳活动周 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子事件通量分布

Fig. 1 Distribution of SPE fluences between 20th and 23rd solar cycles for protons of $E > 10\,\mathrm{MeV}$

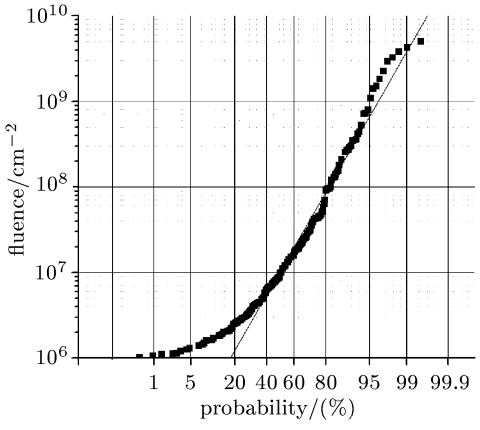


图 2 第 20 至第 23 太阳活动周 $E > 30\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子事件的通量分布

Fig. 2 Distribution of SPE fluences between 20th and 23rd solar cycles for protons of $E > 30\,\mathrm{MeV}$

一般来说, 太阳活跃年份爆发质子事件较多. 这里统计了最近 4 个太阳活动周表征太阳活动性的太阳黑子数与太阳质子事件 ($E > 10\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量超过 $10^7\,\mathrm{cm}^{-2}$) 发生次数之间的关系. 图 3 为最近 4 个太阳活动周太阳黑子年均值与太阳质子事件年爆发次数的关系. 可以看出, 两者变化趋势大致相同. 从太阳黑子数与爆发质子事件年发生次数的相关分析 (见图 4) 可以看出, 二者具有较好的正相关关系, 相关系数为 0.709.

将第 20 至 23 太阳活动周的各个年份, 以太阳黑子年均值 W 为依据, 分为太阳活动高年 (W >100), 太阳活动中等年 ($40 \leqslant W \leqslant 100$), 太阳活动低年 ($W < 40$), 三个时期所占的时间大约为 3:3:4, 不同阶段发生的质子事件次数有明显差异 (见表 2). 针对太阳活动高中低年, 分别统计了中高通量质子事件在所有质子事件中所占的比例, 以 $E > 10\,\mathrm{MeV}$ 的质子事件为例, 统计结果列于表 3. 从表 3 可以看出, 太阳质子事件通量大小与太阳活动期没有明显的相关关系.

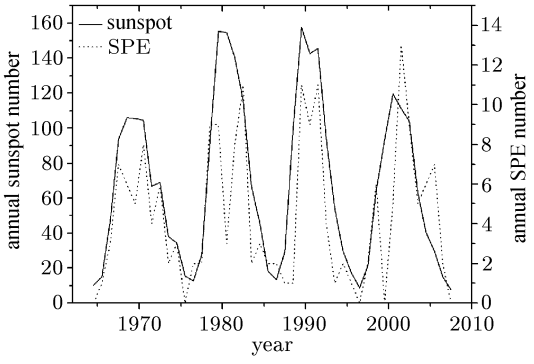


图 3 年均太阳黑子数与太阳质子事件年爆发次数的对比

Fig. 3 Comparison of the sunspot number and annual SPE number with time

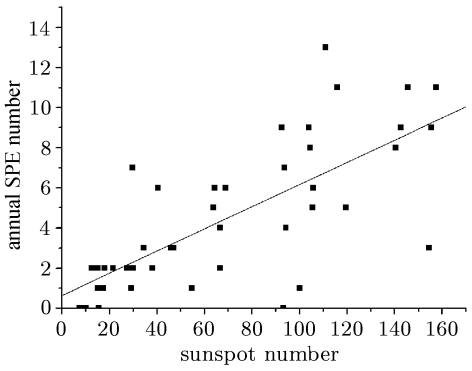


图 4 年均太阳黑子数与太阳质子事件年爆发次数的相关分析

Fig. 4 Correlation between annual SPE number and annual sunspot number

表 2 太阳质子事件在不同活动期的分布统计

Table 2 Distribution of SPE occurrence dates in different phase

E		太阳活动 高年 14 年	中年 13 年	低年 17 年
>10 MeV	太阳质子事件次数	109	56	29
	次数/年数	7.786	4.308	1.706
>30 MeV	太阳质子事件次数	112	64	34
	次数/年数	8.000	4.923	2.000

3 模型方法

通过前面的统计分析可以看出, 在忽略小质子事件对总通量贡献的情况下, 可以认为质子事件的通量分布符合对数正态分布. $f_{\rm p}$ 是一次事件的质子通量, 设 $f_{\rm p}=10^F$, 若 $f_{\rm p}$ 符合对数正态分布, 则 F 符合正态分布, 其概率密度函数为

$$f(F)=(1/\sqrt{2\pi}\sigma)\exp\Big\{-\frac{1}{2}[(F-\mu)/\sigma]^2\Big\}. \quad (1)$$

其中, σ 为标准偏差, μ 为通量对数的期望值, 这两个值可以从图 1 和图 2 所示的太阳质子事件通量分布中获得. 表 4 给出由图 1 和图 2 所得的正态分布期望值和标准偏差值.

与 JPL 模型 [2−3] 类似, 采用一个组合概率确定在一段时期 τ 内, 质子通量超过 $f_{\rm p}$ 的概率, 有

$$P(>F,t)=\sum_{n=1}^{\infty}p(n,\omega\tau)Q(F,n). \quad (2)$$

$p(n,\omega\tau)$ 为时间 τ 内发生 n 次质子事件的概率, ω 为质子事件年平均的发生次数. 对于质子事件这种相互独立的偶发事件, 事件的发生概率可以用泊松分布表示, 即

$$p(n,\omega\tau)=\mathrm{e}^{-\omega\tau}\frac{(\omega\tau)^n}{n!}. \quad (3)$$

根据上节的统计分析, 不同太阳活动年份年均质子事件发生的次数不同, ω 应按太阳活动水平的高低, 取不同的值, 具体见表 3. 对于跨太阳活动等级的时段, 取

$$\omega\tau=\omega_{\rm h}\tau_{\rm h}+\omega_{\rm m}\tau_{\rm m}+\omega_{\rm l}\tau_{\rm l}. \quad (4)$$

其中, $\omega_{\rm h}$, $\omega_{\rm m}$, $\omega_{\rm l}$ 分别为太阳活动高中低年年均质子事件发生的次数; $\tau_{\rm h}$, $\tau_{\rm m}$, $\tau_{\rm l}$ 分别为 τ 时段内处于不同太阳活动水平的时间. 在一段时间内, 质子事件总数不变的情况下, 事件发生的前后和频率对总通量没有影响, 因此仍可认为 τ 时段内质子事件的发生是随机的. 式 (2) 中的 $Q(F,n)$ 为 n 次事件的总通量超过 10^F 的概率, 它可通过蒙特卡罗方法模拟得到. 具体步骤如下.

第一步 产生 N 组随机数据样本, 每组样本包含 n 个符合标准正态分布的自由随机数 x_i. 一组包含 n 个符合标准正态分布的自由随机数的生成方法是, 首先通过随机程序产生一个在 [0, 1] 区间符合均匀分布的 n 个随机数, 然后利用反转变化的 Box-Muller 方法 [7], 生成符合标准正态分布的一组自由随机数. 设 $x_i=(F_i-\mu)/\sigma$ (μ 和 σ 取表 4 中的值), 则 F_i 的概率密度分布符合质子事件通量对数的分布函数, 即

$$f(F_i)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(\frac{F_i-\mu}{\sigma})^2}. \quad (5)$$

表 3 中高通量事件比例分布统计 ($E>10$ MeV 的质子事件)

Table 3 Statistic of SPE of middle and high fluences dates (for protons of $E>10$ MeV)

太阳活动情况	N	N_1	N_1/N (%)	N_2	N_2/N (%)
高年	109	51	46.8	17	15.6
中年	56	25	44.6	11	19.6
低年	29	16	55.2	3	10.3
平均	194	92	47.4	31	16.0

注 N 为质子通量大于 $1\times10^7\mathrm{cm}^{-2}$ 事件的次数, N_1 为质子通量大于 $1\times10^8\mathrm{cm}^{-2}$ 事件的次数, N_2 为质子通量大于 $1\times10^9\mathrm{cm}^{-2}$ 事件的次数.

表 4　正态分布参数

Table 4　Fitting parameters for normal distribution

物理量	$>10\,\mathrm{MeV}$	$>30\,\mathrm{MeV}$
期望值 $(\mu)/\mathrm{cm}^{-2}$	9.8×10^7	1.0×10^7
标准偏差 (σ)	0.985	1.101
通量范围/cm^{-2}	$>1\times10^7$	$>1\times10^6$

因此, 由一组随机样本数据得到的 $j=\sum_{i=1}^{n}10^{x_i\sigma+\mu}$ 表示了一组随机发生 n 次的质子事件的总通量.

第二步　判断每组随机样本的总通量 j 是否大于等于 10^F, 累计得到 N 组样本中满足上述条件的样本数 M, M 与 N 的比值就是 n 次事件的总通量超过 10^F 的概率.

根据式 (2), 利用上述方法, 就可计算一段时间内, $E>10\,\mathrm{MeV}$ 或 $E>30\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量超过给定值的概率.

4　模型计算结果与讨论

利用本文新构建的模型方法可以计算不同航天任务期在不同太阳活动水平下可能遭遇的太阳质子通量概率. 通过对持续一年任务期中 $E>10\,\mathrm{MeV}$ 和 $E>30\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量概率的计算给出了一年任务期中出现超过给定通量值的概率曲线 (见图 5 和图 6). 在实际航天任务的评估中, 通常要求给出一定置信度下任务期的质子通量. 95% 的置信度意味着 95% 的概率不会出现超过给定质子通量的情况, 也就是只有 5% 的可能出现超过给定质子通量的情况. 利用图 5 和图 6, 通过查找纵坐标对应曲线点的横坐标, 可以得到某种置信度下的质子通量.

图 5 和图 6 中同时给出新模型和 JPL 模型的计算结果. 通过比较可以看出, 新模型在同一置信度下, 太阳活动高中低年的质子通量计算结果有明显的差异, JPL 模型的结果处于太阳活动高年和中等扰动年之间. 表 5 列出一年任务期, 80% 和 95% 置信度下的质子通量情况. JPL 模型中认为太阳活跃年份质子事件的发生频率是常数, 并忽略低年的太阳质子事件, 这会造成模型低估太阳活动高年的通量, 而低估太阳活动中低年的通量. 我们模型中对不同太阳活动水平的年份, 引入不同的质子事件发生频率, 尝试解决 JPL 模型中的这一不足.

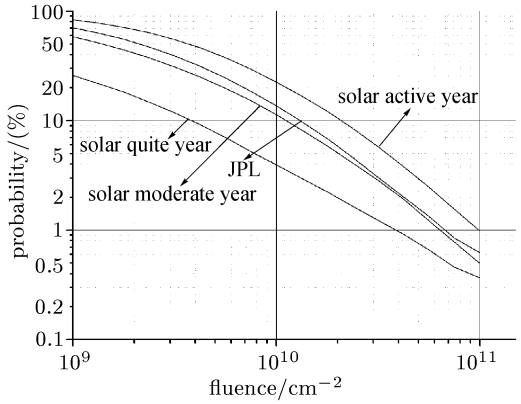


图 5　持续一年任务 $E>10\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量概率

Fig. 5　Fluence probability curves for protons of $E>10\,\mathrm{MeV}$ for one-year mission

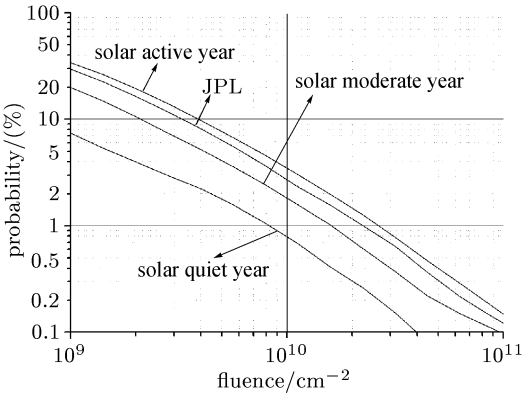


图 6　持续一年任务 $E>30\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量概率

Fig. 6　Fluence probability curves for protons of $E>30\,\mathrm{MeV}$ for one-year mission

表 5　一年任务期内质子通量计算结果

Table 5　Proton fluence values for one-year mission

E	置信度 /(%)	质子通量/cm^{-2} 高年	中年	低年	JPL
$>10\,\mathrm{MeV}$	80	1.1×10^{10}	5.5×10^9	1.5×10^9	6.6×10^9
$>10\,\mathrm{MeV}$	95	3.5×10^{10}	2.0×10^{10}	7.9×10^9	2.1×10^{10}
$>30\,\mathrm{MeV}$	80	1.9×10^9	1.0×10^9	2.7×10^8	1.6×10^9
$>30\,\mathrm{MeV}$	95	7.4×10^9	4.4×10^9	1.7×10^9	5.8×10^9

图 7 给出一个太阳活动周 11 年中新模型和 JPL 模型的计算结果. 新模型计算中太阳活动高中低年

分别取为 3 年、4 年、4 年. 从最终计算结果比较来看, 新模型计算的质子通量明显高于 JPL 的计算结果. 其原因认为主要是由于 JPL 模型忽略了太阳活动低年的太阳质子事件造成的. 表 6 给出了 11 年任务期内, 80% 和 95% 置信度下的质子通量情况.

表 6 11 年任务期内质子通量计算结果

Table 6 Proton fluence values for 11 years mission

E	置信度/(%)	质子通量/cm^{-2}	
		新模型	JPL
$>10\,\mathrm{MeV}$	80	8.0×10^{10}	5.5×10^{10}
	95	1.7×10^{11}	1.1×10^{11}

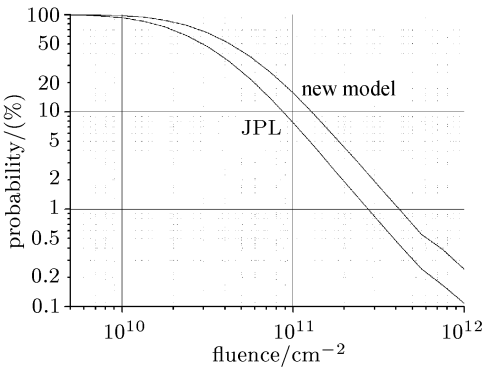


图 7 持续 11 年任务 $E>10\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量概率

Fig. 7 Fluence probability curves for protons of $E>10\,\mathrm{MeV}$ for 11-year mission

5 结语

利用第 20 至 23 太阳活动周太阳质子事件样本, 对太阳质子事件频次、通量分布特征以及与太阳长期活动水平的相关性进行了统计分析. 在统计结果基础上, 利用第 20 至 23 太阳活动周的太阳质子事件数据, 构建了 $E>10\,\mathrm{MeV}$ 和 $E>30\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量新模型. 新模型中针对太阳活动的高中低年, 引入了不同质子事件的发生频率, 能够更精细地评估不同太阳活动水平下的质子通量, 相比目前航天领域常用的 JPL 模型完全忽略太阳平静年份的太阳质子事件, 并假设太阳质子事件爆发频率为常数, 显然更为符合质子事件的分布特征. 本文模型较以往模型采用了更多太阳活动周的数据, 从统计学的角度来分析模型更可靠. 模型中采用的数据是 1 AU 处的观测结果, 对于低中轨道的航天器, 使用时需要进一步考虑地磁场对太阳质子的屏蔽作用.

由于对太阳质子事件的研究时间较短, 有太阳质子事件资料的时间仅 5 个太阳活动周, 且太阳质子事件属于小概率事件, 能够用于研究的事件样本相对较少, 所以研究结果和模型都有待更多数据样本的验证和更新. 另外, 仅根据太阳活动水平参量来判断质子事件的发生特征可能会带来误差, 如何建立更符合实际的太阳高能质子通量模型, 进而开展准确有效的太阳质子通量长期预报评估, 还有待于更多数据积累和进一步的研究工作.

参考文献

[1] King J H. Solar proton fluences for 1977—1983 space missions [J]. *J. Spacec. Roc.*, 1974, **11**(6):401-409

[2] Feynman Joan, Armstrong T P, Dao-Gibner L, Silverman S. New interplanetary proton fluence model [J]. *J. Spacec.*, 1990, **27**:403-410

[3] Feynman J, Spitale G, Wang J. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:13 281-13 295

[4] Nymmik R A. The main characteristics of the solar energetic particle events relevant to the solar activity [R]. Proceeding of the 27th ICRC, 3197-3200, 2001

[5] Armstrong T A, Brungardt C, Meyer J E. Satellite observation of interplanetary and polar cap solar particle fluxes from 1963 to present, weather and climate responses to solar variations [M]. Niwot: Colorado Associated University Press, 1983

[6] Yucker W R. Statistical analysis of solar cosmic ray proton does [R]. McDonald Douglas, Huntington Beach CA, MDCG-D363, 1970

[7] Yost G P. Lectures on Probability and Statistics [M]. Berkeley CA: University of California, LBL-16993 Rev. 84/HWNP3, 1985