0254-6124/2008/28(2)-102-05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Lai Zhijuan, Xue Bingsen. Preliminary attempt in prediction of the solar proton event with proton flux data. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(2): 102∼106

利用质子强度变化对太阳质子事件进行短期预报方法初步研究 *

赖志娟 薛炳森

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

(中国科学院研究生院)

摘 要 采用 GOSE-10 卫星 4∼9 MeV (P2), 9∼15 MeV (P3), 15∼40 MeV (P4), 40∼80 MeV (P5) 能段上的质子通量数据, 结合质子能谱, 对太阳质子事件发生前各能谱参数的变化特征进行分析, 详细介绍利用能谱参数的变化特征及能量 $E > 10$ MeV 的质子通量数据对太阳质子事件进行预报的新方法, 并运用这种方法对 2002—2006 年期间太阳质子事件进行了预报. 预报结果显示, 预报提前量最多达到 100 h 以上, 对质子事件的报准率达 97.5%, 预报方法具备一定的有效性和实用性.

关键词 质子通量; 能谱参数; 太阳质子事件

中图法分类号 P 353

Preliminary Attempt in Prediction of the Solar Proton Event With Proton Flux Data

LAI Zhijuan XUE Bingsen

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Solar Proton Events (SPE) bring a significant radiation hazard to spacecraft and astronaut within and beyond the magnetosphere. Knowing and understanding the rule and precursor characteristic, establishing accurate prediction model to carry on the forecast of solar proton events, taking protective measures are of vital significance for the safety of the spacecraft and astronaut. Massive research has indicated that, before the eruption of solar activity, part of energetic particles may escape the binding of active region magnetic field, and disseminate towards interplanetary space along magnetic field line. Therefore, before the proton events, an increase of high energy proton flux may be seen in the earth-synchronous orbit. The proton energy spectrum before solar proton events which related with the solar nearby acceleration process has obvious difference with that of the general proton flux stochastic fluctuation. Therefore we may carry on the forecast of solar proton events through analyzing the energy spectrum parameters of proton before event. According to the proton energy spectrum, the variation of energy spectrum parameters before the commence of SPE

* 国家重点基础研究计划项目资助

2007-06-26 收到原稿, 2007-12-28 收到修定稿

was analyzed in this paper with proton flux data from channel 4∼9 MeV, 9∼15 MeV, 15∼40 MeV, 40∼80 MeV on the GOES satellite. A new method was introduced to use the variation of energy spectrum parameters and the proton flux data with energy $E > 10$ MeV to predict SPE. Then, the method was used for SPE forecast based on the five-years data selection in 2002—2006 by test. The result turned out to be encouraging with the accuracy rate reaches to 97.5% and have an advance time of several tens minutes up to over a hundred hours.

Key words Proton flux, Energy spectra parameter, Solar Proton Events (SPE)

1 引言

太阳质子事件是一种强烈的太阳爆发事件，是指在地球轨道附近即距离太阳 1 AU 处观测到的起源于太阳的质子通量增强事件，目前国际上公认的标准是能量大于 10 MeV 的质子通量超过 $10/(\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{s}\cdot\mathrm{sr})$. 质子事件的发生率随太阳活动呈 11 年的变化周期. 一般来说，大部分太阳质子事件发生在太阳活动高年，但就每次质子事件而言，其发生的时间和强度是随机的.

太阳质子事件期间的高能粒子增强对人类空间活动造成严重的危害. 例如，高能粒子对航天器的材料、电子器件及宇航员的辐射损伤效应，高能粒子对大规模集成电路的微电子器件产生的单粒子事件效应等. 随着空间技术的快速发展，质子事件造成的损失会更加严重和广泛. 为了避免和减轻高能粒子环境的影响，了解和认识太阳质子事件的发生规律和先兆特征，建立准确的预报模型对质子事件进行预报，采取防护措施，对保障航天器和航天员的安全有着重要的意义.

太阳质子事件通常与太阳耀斑相联系. 目前对质子耀斑的预报主要根据近期太阳活动区的演化情况, 包括活动区的面积和分布, 磁场的强度和复杂程度及其变化, 也有一些供参考的经验公式 [1]. Cliver 等 [2],[3] 利用耀斑 1∼8 Å辐射的变化来对耀斑进行了归类分析，统计发现， 30% 的渐变耀斑 (级别 > M5.0) 伴有质子事件，而脉冲型只有 3%. 软 X 射线耀斑及太阳射电暴的特征也被用来诊断质子事件. 在 2000 年之前，利用质子耀斑相关技术对太阳质子事件进行提前量长达 48 h 的预报研究非常少. 2004 年 Patrik[4] 以太阳 X 射线通量和太阳射电通量作为预报参量，对太阳质子事件进行了提前量长达 48 h 的预报研究，成功率达到了 65%. 由于质子事件产生机制和传播过程复杂，且缺乏相关理论模型的解释，采用这种方法对太阳质子事件进行预报和警报存在很大困难，且预报准确率不高.

目前普遍的观点认为，粒子是由日冕和行星际介质中日冕物质抛射所驱动的激波来加速的. 粒子沿着行星际磁场进行传播，质子事件的强度与源区的位置有关，与观测卫星处于同一磁力线上的质子将首先沿着磁力线传播到达观测点. 大量研究也表明，太阳活动爆发之前，部分高能粒子可能逃脱活动区磁场的束缚，沿着开放的磁力线向行星际空间传播. 因此，质子事件发生之前在地球同步轨道可以看到高能质子通量的增加. 由于这种质子事件之前的质子通量增加与太阳附近的加速过程有关，那么此时的质子能谱将与一般质子通量随机涨落有着明显的区别. 于是可以通过分析质子通量增加时的能谱参数从而实现对质子事件进行预报. 基于质子的这些特征都可能在其能谱传输过程中得到体现. 本文将介绍一种新的预报方法，采用 GOSE-10 卫星上 4∼9 MeV, 9∼15 MeV, 15∼40 MeV, 40∼80 MeV (P2∼P5) 能段质子通量的数据, 结合质子能谱, 分析各能谱参数的变化特征, 同时考虑能量 $E > 10$ MeV 的质子通量数据，对质子事件进行预报. 其预报提前量最多达到一百多小时, 且对 2002—2006 年期间质子事件的报准率达 97.5% (40/41), 预报效果较以前有明显的提高.

2 数据和方法

采用 GOSE-10 卫星上 1 h 平均的 4∼9 MeV, 9∼15 MeV, 15∼40 MeV, 40∼80 MeV (P2∼P5) 能段的质子微分通量数据和能量 $E > 10$ MeV 的质子积分通量数据* 来进行分析.

2004 年，O'Neill 通过利用 ACE 卫星的数据对

*http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html

Badhwar-O'Neill 银河宇宙线模型进行了修正, 提出了更精确的粒子能谱形式. 在这里我们采用如下新的能谱形式来表示质子微分能谱:

$$J(E) = j_0\beta^{\delta}/(E+E_0)^{\gamma}. \tag{1}$$

其中, J 为质子的微分能谱; E 为质子的动能; E_0 取 938 MeV, 为质子的静止能量; $\beta = v/c$ (v 为粒子速度, c 为光速); γ, δ 和 j_0 为能谱参数 [5].

假设对于不同能段 γ 的值不同, δ 和 j_0 的值保持不变. 对方程两边同时求对数得到

$$\ln J(E) = -\gamma \ln(E+E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta.$$

结合质子各个能段的微分通量数据, 求解一欠定方程组, 有

$$\begin{aligned}
\ln J_2(E) &= -\gamma_2 \ln(E+E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta,\\
\ln J_3(E) &= -\gamma_3 \ln(E+E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta,\\
\ln J_4(E) &= -\gamma_4 \ln(E+E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta,\\
\ln J_5(E) &= -\gamma_5 \ln(E+E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta.
\end{aligned} \tag{2}$$

求得方程组的通解为

$$\begin{pmatrix}\gamma_2\\ \gamma_3\\ \gamma_4\\ \gamma_5\\ j_0\\ \delta\end{pmatrix} = \alpha_1 \begin{pmatrix}a_1\\ a_2\\ a_3\\ a_4\\ a_5\\ a_6\end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix}b_1\\ b_2\\ b_3\\ b_4\\ b_5\\ b_6\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}c_1\\ c_2\\ c_3\\ c_4\\ c_5\\ c_6\end{pmatrix},$$

其中, α_1 和 α_2 为任意常数. 为了计算方便, 同时又不影响计算结果, 取 α_1 和 α_2 为 1, 就得到相应的能谱参数 j_0, δ 和 γ_i. 能谱参数 j_0 为质子原始强度, 反映的是质子整体的通量变化特征. δ 与太阳爆发活动有关. 太阳活动爆发时伴随了能量的释放, δ 相应减小. γ_i 反映的是能量为 i 的质子对太阳爆发活动的响应情况, $i = 2, 3, 4, 5$ 分别对应着 P2~P5 四个能段.

除了 2003 年 5 月的两次事件缺乏数据外, 我们对 2002—2006 年的其他 41 次事件进行统计, 发现在质子事件发生前几个小时甚至一百多个小时, 质子能谱参数就表现出了明显的变化特征. 下面以 2005 年 1 月 16 日 0210 UT 发生的质子事件为例. 图 1 给出了 2005 年 1 月 10—17 日质子能谱参数的变化趋势. 从图 1 可以看到, 在 1 月 15 日上午, 各能谱参数就有明显的变化, j_0 增大, δ 和 γ_i 均减小. 其他大多数质子事件之前, 质子能谱都呈现出相似的变化特征. 因此, 可以利用能谱参数的这种变化特征来对质子事件进行预报.

选取 j_0 作为预报参量, 取

$$R(i) = j_0(i)/\overline{j_0},$$

其中, $\overline{j_0}$ 为当前时间之前 5~9 h 计算得到的 j_0 的平均值, 即

$$\begin{aligned}
\overline{j_0} = [&j_0(i-5) + j_0(i-6) + j_0(i-7) +\\
&j_0(i-8) + j_0(i-9)]/5,
\end{aligned}$$

其给出的是 j_0 的背景值, i 代表时间序列, 以 $R(i) \geqslant 1.06$ 作为预报标准. 为了提高预报精度, 还以 $E > 10$ MeV 的 1 h 平均质子积分通量数据 M 作为辅助预报参量, 即以 $R(i) \geqslant 1.06$, 且 $M(i) \geqslant 0.33$ $(\mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{sr})^{-1}$ 作为有质子事件发生的预报标准. 运用这种方法对 2005 年 1 月 10—17 日质子事件进行了预报, 预报结果如图 1(a) 所示, 其中竖实线表示首次预报有质子事件发生的时间, 竖点线表示实际质子事件开始发生的时间.

3 结果分析

从图 1 可以看到, 结合质子能谱参数及积分通量 ($E > 10$ MeV) 进行分析, 可以对太阳质子事件进行预报. 为了进一步确认该方法的准确性, 利用上述预报标准对 2002—2006 年的所有事件进行了预报, 并作了统计. 图 2 给出的是以 2005 年 7—9 月为例的预报结果, 其中竖实线表示质子事件的预报时间, 竖虚线表示实际质子事件开始发生的时间, 图 2 中所对应的每次事件只给出了首次预报的时间. 对 2002—2006 年所有太阳质子事件的预报情况在表 1 中给出. 从表 1 可以看到, 根据质子能谱参数及 $E > 10$ MeV 的质子积分通量进行太阳质子事件预报, 其提前量可达几十分钟至一百多小时. 我们还发现, 2002—2006 年发生的 43 次事件中, 除了 2003 年 5 月的两次事件没有数据外, 只有 2003 年 11 月 4 日发生的质子事件被漏报, 对太阳质子事件的报准率达 97.5% (40/41), 漏报率仅为 2.5% (1/41). 若把预报结果以一天为时间单位, 每一天作为一次预报, 那么在整个 2002—2006 年期间, 有 25 次 (25 天, 其中 2003 年 4 月 23 日和 4 月 24 日, 2004 年 7 月 30 日 、7 月 31 日 、8 月 1 日 、8 月

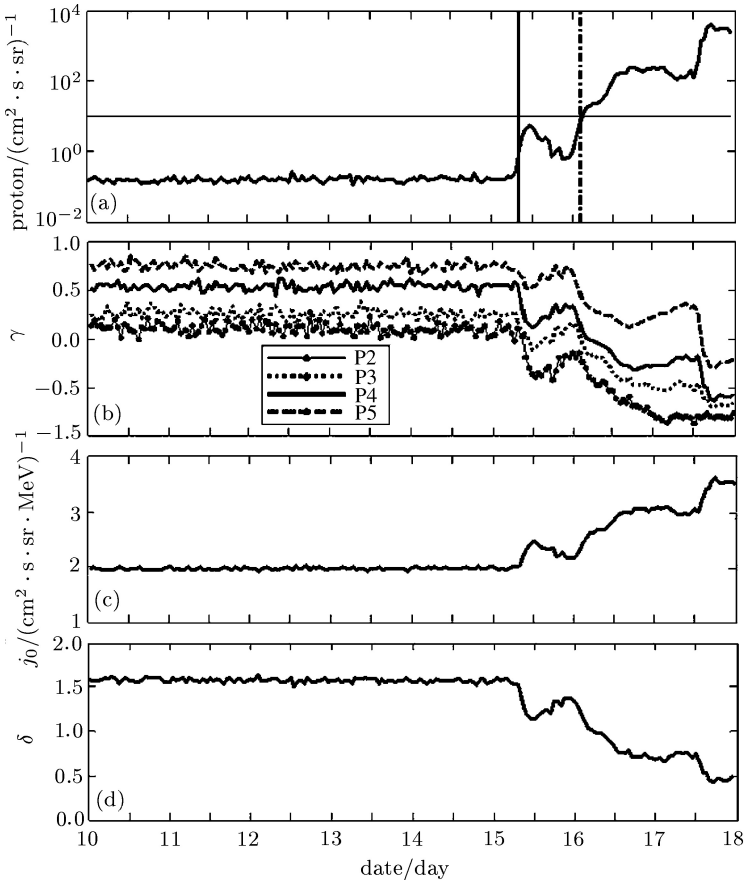


图 1　2005 年 1 月 10—17 日质子 ($E > 10$ MeV) 的积分通量变化曲线及能谱参数的变化趋势 (竖实线表示质子事件的预报时间, 竖点线表示实际质子事件开始发生的时间)

Fig.1　Temporal profile of integral proton flux with $E > 10$ MeV and parameters of proton energy spectrum γ, δ, j_0 for the period 10—17 Jan., 2005 (Moments of SPE predictors' manifestation and actual beginning time are marked by the solid vertical line and the dot-dashed vertical line separately at the upper panel)

表 1　2002—2006 年太阳质子事件的预报结果

Table 1　Results of the SPE prediction for the period 2002—2006

编号	质子事件发生时间 年-月-日	UT	预测最大提前量 /h	编号	质子事件发生时间 年-月-日	UT	预测最大提前量 /h
1	2002-01-10	2045	108.75	23	2003-10-26	1825	98.42
2	2002-01-15	1435	5.58	24	2003-10-28	1215	8.25
3	2002-02-20	0730	0.50	25	2003-11-02	1105	66.08
4	2002-03-17	0820	21.33	26	2003-11-04	2225	漏报
5	2002-03-18	1300	4	27	2003-11-21	2355	82.92
6	2002-03-20	1510	0.17	28	2003-12-02	1505	2.08
7	2002-03-22	2020	3.33	29	2004-04-11	1135	5.58
8	2002-04-17	1530	140.50	30	2004-07-25	1855	72.92
9	2002-04-21	0225	31.50	31	2004-09-13	2105	1.08
10	2002-05-22	1775	9.42	32	2004-09-19	1925	1.42
11	2002-07-07	1830	63.50	33	2004-11-01	0655	46.92
12	2002-07-16	1750	3.83	34	2004-11-07	1910	15.17

续表

13	2002-07-19	1050	0.83	35	2005-01-16	0210	18.17
14	2002-07-22	0655	31.92	36	2005-05-14	0525	7.72
15	2002-08-14	0900	5	37	2005-06-16	2200	1
16	2002-08-22	0440	77.67	38	2005-07-14	0245	95.75
17	2002-08-24	0140	18.67	39	2005-07-27	2300	22
18	2002-09-07	0440	20.67	40	2005-08-22	2040	17.67
19	2002-11-09	1920	2.33	41	2005-09-08	0215	3.25
20	2003-05-28	2335	无数据	42	2006-12-06	1555	22.92
21	2003-05-31	0440	无数据	43	2006-12-13	0310	0.17
22	2003-06-18	2050	47.83				

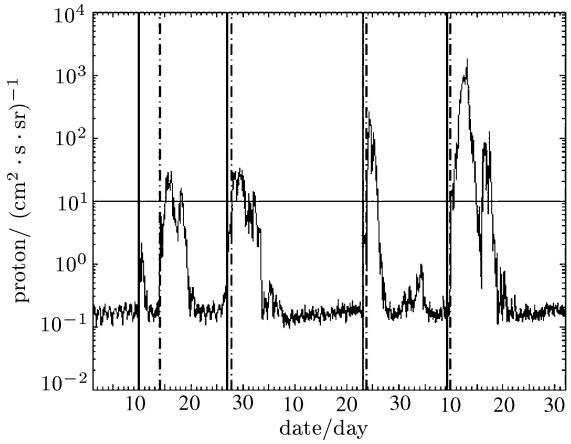


图 2 2005 年 7—9 月 $E > 10$ MeV 的质子积分通量变化曲线 (竖实线表示质子事件的预报时间, 竖点线表示实际质子事件开始发生的时间)

Fig.2 Temporal profile of integral proton flux with $E > 10$ MeV for the period July—September, 2005 (Moments of SPE predictors' manifestation are marked by the solid vertical lines, and the actual moments are marked by the dot-dashed vertical lines)

2 日, 2005 年 9 月 17 日、 9 月 18 日是连续的) 虚报, 其预报为有太阳质子事件发生, 但在接下来的几天里却没有发生太阳质子事件, 因此虚报率也比较低, 为 20.8%. 所以根据 2002—2006 年的预报结果可以得出, 利用新的预报标准对太阳质子事件进行预报, 能够达到理想的效果.

4 总结

通过对质子微分通量数据分析发现, 在太阳质子事件发生之前质子能谱参数就表现出明显的变化特征. 利用这种特征并结合 $E > 10$ MeV 的质子通量数据对 2002—2006 年太阳质子事件进行预报, 提前量可达几十分钟到一百多小时, 并且对太阳质子事件预报的准确率达 97.5%, 达到较为理想的预报效果.

在预报中, 三个能谱参数我们只选取了 j_0 作为预报参量, 且只对质子事件的有无进行了预报, 而没有对事件的强度及预报提前量进行预报. 从文中的分析可以看到, 在某一时刻对于每一个能段都有一个 γ 值, 且不同能段 γ 值开始减小的时间、减小的幅度以及整体变化情况也不尽相同. 因此, 根据各能段参数 γ 的变化情况有可能对未来太阳质子事件发生的时间及其强度 (峰值通量) 进行预报, 这正是我们下一步要研究的工作.

参考文献

[1] Liu Zhenxing. Space Physics. Ha'erbing: Haerbing Industry Press, 2005. 342~352, in Chinese (刘振兴等. 太空物理学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005. 342~352)

[2] Cliver E, Gentile L, McNamara L. Peak-flux-density of large solar radio burst and proton emission from flares. In: Solar-Terrestrial Predictions Proceeding of a Workshop, Meudon, France, 1984. 212

[3] Cliver E. X-class soft burst and major proton event during solar cycle 21. In: Solar-Terrestrial Predictions Proceeding of a Workshop, Leura, Australia, 1989. 359

[4] Patrick G J. The development of a solar proton event prediction model. In: Ph.D. Dissertation. England: University of Southampton, 2004. 467

[5] O'Neill P M. Badhwar-O' Neill galactic cosmic ray model update based on advanced composition explorer (ACE) energy spectra from 1997 to present. *Adv. Space. Res.*, 2006, **37**:1727~1733