0254-6124/2017/37(3)-262–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CUI Yanmei, SHI Liqin, LIU Siqing. Study on the short to medium term forecast model of solar proton event (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(3): 262-269. DOI:10.11728/cjss2017.03.262

太阳质子事件中短期预报模型研究

崔延美[1] 师立勤[1,2] 刘四清[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 太阳质子事件通量的预测对航天器抗辐射加固设计和航天员出舱活动具有非常重要的意义. 针对一年以下的航天任务, 利用经验统计方法, 确认太阳活跃年和太阳平静年期间, 1—365 天不同时间段内 >10 MeV, >30 MeV 和 >60 MeV 的太阳质子事件积分通量符合对数正态分布, 且通量对数的标准偏差 σ 和期望值 μ 随任务期时间的变化满足对数函数形式. 以此为基础, 构建太阳质子通量的中短期预报模型. 该模型能够针对太阳活跃年和太阳平静年, 给出一定置信度下 1—365 天不同时间内 >10 MeV, >30 MeV 和 >60 MeV 的质子事件通量分布, 从而为执行中短期航天任务提供太阳质子事件通量的预测, 以规避不必要的风险.

关键词 太阳质子事件, 太阳质子通量, 中短期预报模型, 航天任务

中图分类号 P 353

Study on the Short to Medium Term Forecast Model of Solar Proton Event

CUI Yanmei[1] SHI Liqin[1,2] LIU Siqing[1,2]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Solar proton event forecast is very important to guarantee the security of spacecrafts and astronauts. According to the short to medium term space mission, the solar proton fluences whose energy are greater than 10 MeV, 30 MeV and 60 MeV are statistically analyzed. It is found that the probability of solar proton fluences has a normal distribution, and their standard deviations and expectations are logarithmic functions over different time period from Day 1 to 365. Consequently, a short to medium term forecast model of solar proton fluences is built, which can forecast the solar proton fluences whose energy are greater than 10 MeV, 30 MeV and 60 MeV with certain confidence levels for different time period. Therefore, this model is very helpful to safely carry out the space mission which task period is less than 1 year.

Key words Solar proton events, Solar proton fluence, Short to medium term forecast model, Space mission

2015-12-17 收到原稿, 2016-11-07 收到修定稿

E-mail: ymcui@nssc.ac.cn

0 引言

太阳爆发活动 (耀斑或日冕物质抛射) 发生时会喷射出大量的高能粒子. 受不同加速机制的作用, 这些粒子通常从太阳低层大气到行星际空间的广泛空间尺度上被加速到很高的能量, 最终被地球附近的空间探测器以及地面上的粒子监测仪所观测到. 由于从太阳喷射出来的高能粒子绝大部分都是质子, 占高能粒子总数的 90% 以上, 其次是 α 粒子, 电荷数 >3 的粒子很少, 所以通常把该事件称之为太阳质子事件. 事件中的高能粒子加速涉及各种辐射机制、粒子的传输及具体磁场形态, 是一个比较复杂的问题. 对应于不同的太阳活动和加速过程, 太阳质子事件大体可分为两类: 脉冲型事件和缓变型事件 [1,2]. 在实际的太阳质子事件中, 脉冲型和缓变型质子事件并不能明确地割裂开来, 而是通常同时伴随了耀斑和 CME, 由耀斑和 CME 过程中的加速过程共同作用的混合型质子事件 [3].

在航天器设计阶段或从事空间活动任务期间, 需要提前预知太阳质子事件的发生状况, 以采取相应措施来规避不必要的风险. 根据对质子事件预报时间提前量要求的不同, 质子事件预报主要是长期预报、中期预报、1~3 天的短期预报或警报. 长期预报是预报未来一段长时间内 (通常一年以上) 质子事件的积分通量或能谱, 适用于航天器的飞行计划、轨道设计、姿态控制的制定以及有关空间敏感器和探测器的设计等. 国际上应用比较普遍的质子事件长期预报模型有 King 模型 [4]、JPL 模型 [5,6]、ESP[7−12] 模型及 MSU 模型 [13]. Li 等 [14] 利用 4 个太阳活动周的数据评估不同太阳活动水平下的质子通量, 建立新模型. 短期预报主要是预报质子事件的发生和级别, 为航天员出舱、太空行走及运行各类对高能辐射敏感的科学设备等提供风险规避依据.

目前主要的空间环境业务预报机构大都提供质子事件 1~3 天的短期预报或警报, 例如中国科学院国家空间科学中心空间环境预报中心、美国国家国家海洋和大气局空间天气预报中心每日均提供未来 1~3 天的质子事件概率预报.

近年来太阳质子事件短期预报研究不断深入, 预报因子包含 10 cm 射电流量、活动区位型参量、磁场参量等相关因素, 在预报技术上除传统的统计分析方法, 还增加了人工智能方法 [15−19]. 质子事件警报是提前分钟至小时量级的事件预报. 典型的两个业务运行模型为美国国家海洋和大气局空间天气预报中心的 PROTONS 模型 [20−22] 以及美国空气动力研究实验室的质子预报系统 (PPS)[23−26], 主要预报质子事件发生的可能性及时间等. Xiong 等 [27] 利用 ACE 卫星大于 10 MeV 的实时通量数据对太阳质子事件进行警报. 中期预报通常指提前几星期至数月对质子事件通量和时间分布进行的预报.

目前还没有很有效的太阳质子事件中期预报方法和比较成熟实用的模型. 航天工程对事件的中期预报具有较大的需求, 在考虑太阳质子事件时, 通常借鉴历史上曾经发生的最恶劣事件或某一次普通质子事件进行分析, 缺乏统计依据. 文献 [28] 利用 1967−2014 年期间的太阳高能粒子观测数据, 初步计算出一定置信度下, 一年以下任务时间内大于 10 MeV 质子事件的通量分布. 本文采用文献 [28] 中的统计方法, 对 >30 MeV 和 >60 MeV 的质子事件通量进行统计分析, 确认这两个能道上太阳质子通量的分布形式. 在此基础上对 >10 MeV, >30 MeV, >60 MeV 能道的太阳质子事件通量建立统一的中短期预报模型, 为中短期航天任务的执行提供太阳质子事件通量预测.

1 数据处理

这里采用的太阳质子数据同文献 [28], 主要来自 OMNI 网站 *. 选用的数据时间段为 1967−2014 年, 能段包括 >10 MeV, >30 MeV 和 >60 MeV. 对于缺失数据采用插值法进行补充. 在 2001 年下半年以及 2002 年和 2003 年中有大段数据缺失, 采用 GOES 卫星观测数据进行了补充.

当 >10 MeV 的质子通量日均值大于 1 PFU 时, 认为发生了质子事件. 不满足该条件时, 则认为没有质子事件发生, 太阳质子通量计为 0. 同时将太阳活跃年和太阳平静年分别考虑. 一个太阳活动周中极大年的前 2.5 年到后 4.5 年为太阳活跃年, 活动周内其余 4 个年份为太阳平静年. 数据统计样本中, 考虑的太阳活跃年共计 32 年, 包括 1967−1972 年、1977−1983 年、1987−1993 年、1998−2004 年及 2010−2014 年, 其余 16 年为太阳平静年.

*http://omniweb.gsfc.nasa.gov/

2 太阳质子通量分布

文献 [28] 确认能量 $> 10\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子事件通量分布符合对数正态分布. 这里采用同样的统计方法确认能量 $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量分布形式. 对应 1~365 天不同的时间段, 通过时间窗口的滑动, 对能量 $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量进行累计计算, 即得到相应能道上的太阳质子积分通量. 具体方法是: 假定总样本为连续天数 N, 当假定任务期时间为 n ($n = 1, 2, 3, 4, \cdots, 365$) 天时, 进行逐日的时间窗口滑动, 可以得到 $N - n + 1$ 组时间段为 n 天的样本. 对 $N-n+1$ 组样本中 $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子进行日积分通量累计, 可得到 n 天时间段内对应能道上的太阳质子通量数值.

在假定的任务期时间 n 天中, 分别比较太阳活跃年和太阳平静年太阳质子通量分布与对数正态分布的关系. 通过设定一系列太阳质子通量阈值, 计算 n 天内不同能道上太阳质子通量小于给定阈值的比例, 即 $(i \times 100)/(M + 1)$ 的数值, 其中 i 为通量小于给定阈值的样本数, M 为样本总数. 在正态分布坐标系中对比太阳质子通量与比例值的关系, 发现在太阳活跃年和太阳平静年 1−365 天不同时间段内, 能量 $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量均基本符合对数正态分布. 图 1 给出了太阳活跃年和太阳平静年期间, 时间段为 5 d 和 50 d 时, 能量 $> 10\,\mathrm{MeV}$, $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量分布. 纵轴为对数坐标下的质子通量, 横轴为正态分布坐标下样本中通量小于给定阈值的比例. 从图 1 可以看出, 多数能量 $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量数据分布在一条直线上, 即太阳质子通量分布基本符合对

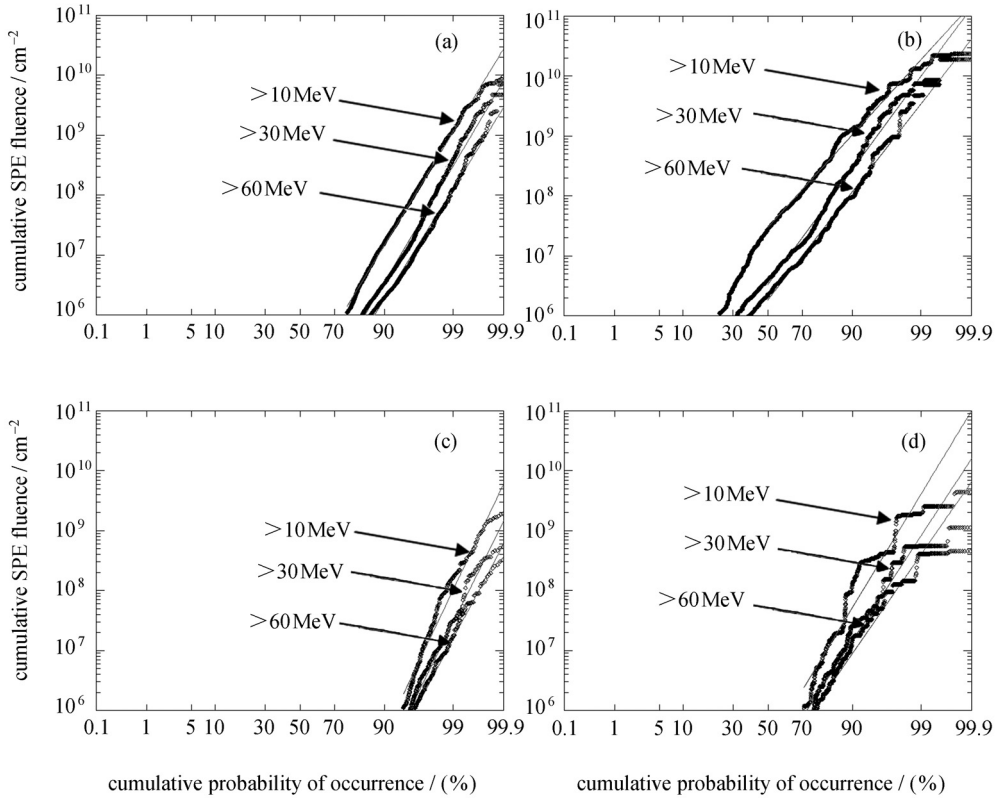

图 1 太阳质子通量分布. 三条直线分别为对能量 $> 10\,\mathrm{MeV}$, $> 30\,\mathrm{MeV}$ 和 $> 60\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量数据点的拟合. (a) (b) 为太阳活跃年 5 d 和 50 d 时间段的太阳质子通量分布, (c) (d) 为太阳平静年 5 d 和 50 d 时间段的太阳质子通量分布

Fig. 1 Distributions of solar proton fluences. The black data points are fitted by the straight red line, which correspond to the protons fluences whose energy are greater than 10 MeV, 30 MeV and 60 MeV, respectively. (a) (b) and (c) (d) are the distributions within 5-day and 50-day period in solar active years and those within 5-day and 50-day period in solar quiet years

数正态分布. 由此可得太阳质子通量分布的概率密度函数

$$f(F)=\frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma}\exp\left(\frac{-\lg F-\mu^2}{2\sigma^2}\right). \tag{1}$$

其中, F 为假定任务期时间内的太阳质子通量, σ 为通量对数的标准偏差, μ 为通量对数的期望值.

由图 1 通过直线拟合可以获得太阳质子通量概率密度函数中 σ 和 μ 的数值. 在航天任务中, 大的太阳质子通量更为引人关注, 因此这里只对 50% 概率以上的数据点进行直线拟合, 得到对应 1—365 天不同时间段内, 能量 $>10\,\mathrm{MeV}$, $>30\,\mathrm{MeV}$ 和 $>60\,\mathrm{MeV}$ 不同能道 σ 和 μ 不同的拟合取值. 以时间为横轴, σ 和 μ 的拟合取值分别为纵轴, 利用时间的对数函数描述 σ 和 μ 的取值, 结果如图 2 所示. 具体的对数函数公式为

$$y=a_0-a_1\ln(d+a_2). \tag{2}$$

其中, d 为时间变量 (单位 d), a_0, a_1 和 a_2 为函数的参数. 太阳活跃年和太阳平静年能量 $>10\,\mathrm{MeV}$, $>30\,\mathrm{MeV}$ 和 $>60\,\mathrm{MeV}$ 的太阳质子通量对应该公式中各参数的拟合结果列于表 1.

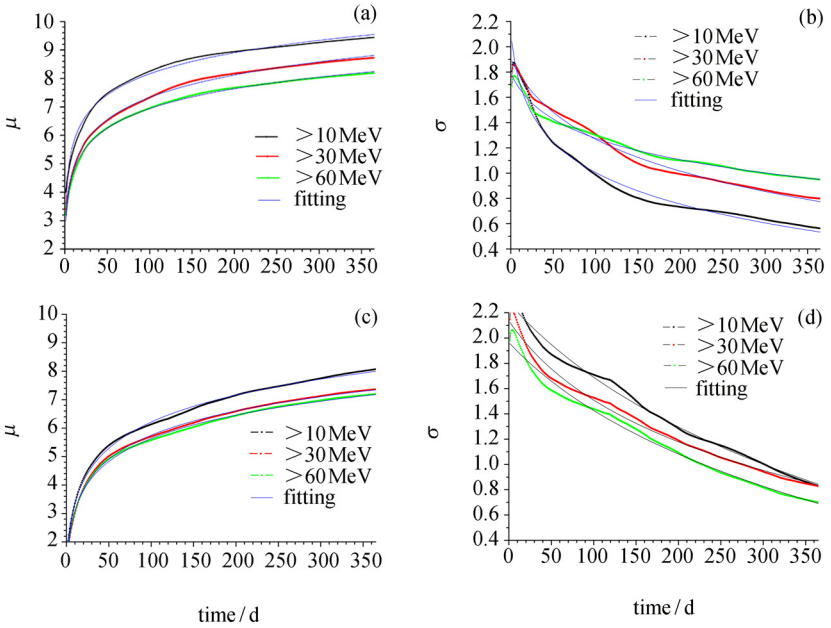

图 2 太阳质子通量对数正态分布的标准偏差 σ 和期望值 μ

Fig. 2 Standard deviation σ and expected value μ of normal distribution of solar proton fluences

表 1 对不同能道 σ 和 μ 进行对数函数拟合的参数值

Table 1 Parameter values in the fitting function for σ and μ

	能道	σ 参数拟合				μ 参数拟合			
		a_0	a_1	a_2	R^*	a_0	a_1	a_2	R^*
太阳活跃年	$>10\,\mathrm{MeV}$	2.754	0.375	5.628	0.986	3.221	−1.072	0.422	0.991
	$>30\,\mathrm{MeV}$	3.471	0.450	32.759	0.990	2.011	−1.152	1.799	0.997
	$>60\,\mathrm{MeV}$	2.604	0.278	18.653	0.991	2.278	−1.010	1.006	0.998
太阳平静年	$>10\,\mathrm{MeV}$	8.311	1.194	156.555	0.991	−0.297	−1.403	3.577	0.997
	$>30\,\mathrm{MeV}$	5.233	0.723	72.605	0.990	−0.030	−1.250	2.172	0.998
	$>60\,\mathrm{MeV}$	6.798	0.982	137.457	0.990	0.009	−1.214	2.755	0.998

注 R^* 为校正的决定系数.

3 模型建立与验证

在实际航天任务评估中, 通常要求给出一定置信度下任务期的质子通量. 95% 的置信度意味着在 95% 的概率下不会出现超过给定质子通量的情况, 即只有 5% 的可能出现超过给定质子通量的情况. 通过上节中拟合得到的参量可以确定太阳质子通量的概率密度, 从而计算出一定置信度下不同航天任务期能量 $>10\,\mathrm{MeV}$, $>30\,\mathrm{MeV}$ 和 $>60\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量. 图 3 中给出了太阳活跃年和平静年期间, 任务期时间为 5 d 和 50 d, 能量 $>10\,\mathrm{MeV}$, $>30\,\mathrm{MeV}$ 和 $>60\,\mathrm{MeV}$ 的质子通量概率分布. 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. 例如通过查找图 3 中任务期 50 d 时的质子通

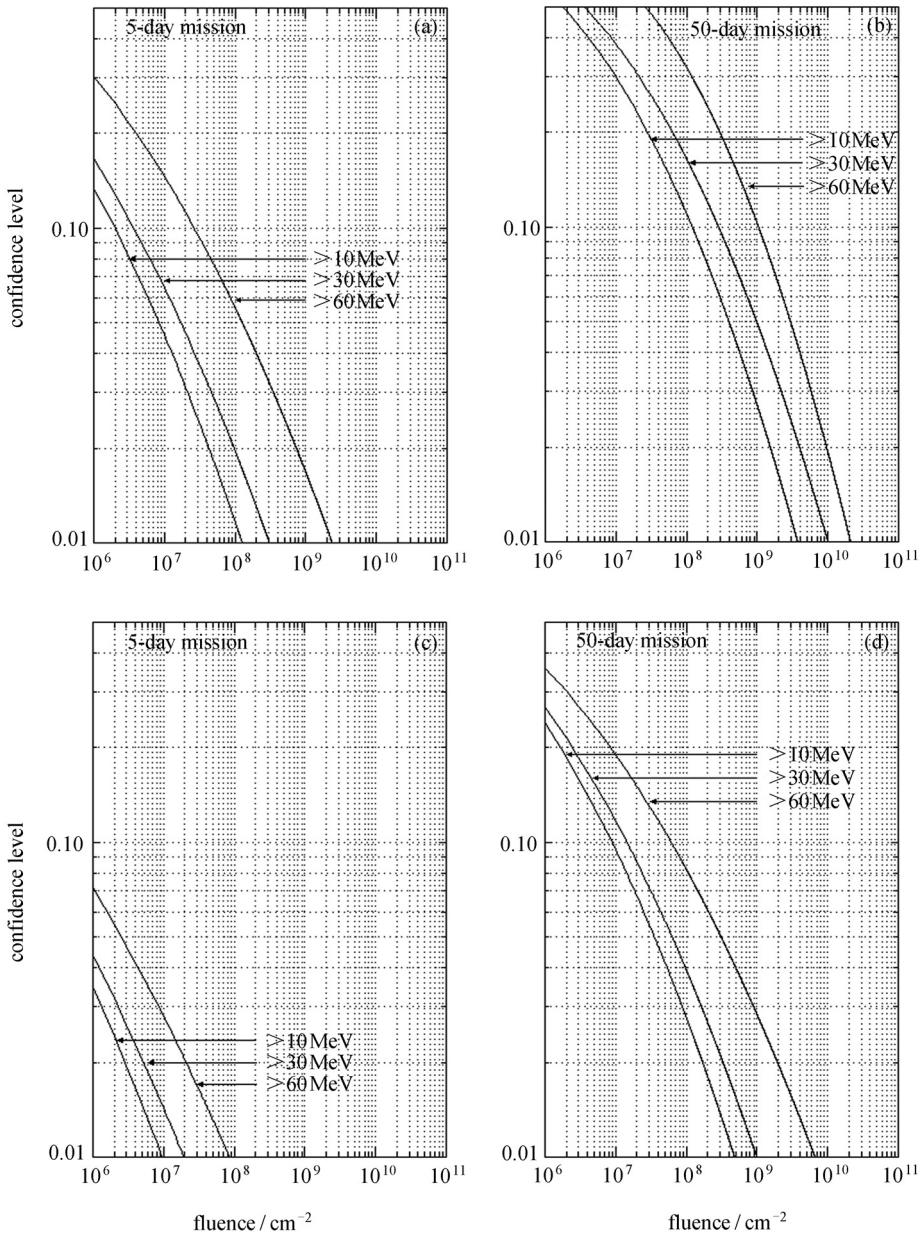

图 3 质子通量概率分布. (a) 太阳活跃年任务期 5 d 的太阳质子通量概率分布, (b) 太阳活跃年任务期 50 d 的太阳质子通量概率分布, (c) 太阳平静年任务期 5 d 的太阳质子通量概率分布, (d) 太阳平静年任务期 50 d 的太阳质子通量概率分布

Fig. 3 Probability distributions of solar proton fluences. (a) (b) and (c) (d) are the probability distributions that within 5-day and 50-day period in solar active years and those within 5-day and 50-day period in solar quiet years

量概率曲线, 可以得到太阳活跃年内任务期时间为 50 d 时, 95% 的置信度下能量 > 10 MeV, > 30 MeV 和 > 60 MeV 的质子通量分别为 $2.96\times10^{9}\,\mathrm{cm}^{-2}$, $9.80\times10^{8}\,\mathrm{cm}^{-2}$ 和 $3.98\times10^{8}\,\mathrm{cm}^{-2}$.

为了检验模型的预测效果, 对不同置信度水平下 1—365 天不同时间内太阳质子通量模型预测结果与实测结果进行对比. 图 4 给出了太阳活跃年和太阳平静年能量 > 10 MeV, > 30 MeV 和 > 60 MeV 的质子通量模型预测与实测结果的对比. 从图 4 可以看到, 模型预测整体上与实测符合较好. 在太阳平静年且置信度为 99% 时, 任务期大约 30 天以上时的 (不同能道会有不同) 偏离较大. 此外, 模型预测效果与任务期时间、置信度水平有关. 低置信度水平下的模型预测与实测符合程度好于高置信度水平下模型预测与实测的符合程度, 较短任务期时间内模型预测与实测符合程度好于较长任务期时间内模型预测与实测的符合程度.

此外, 对太阳活跃年任务期时间一年 (365 天) 能量 > 10 MeV 质子通量的概率分布进行预测, 并将预测结果与 JPL 模型预测的结果进行比对, 结果如图 5

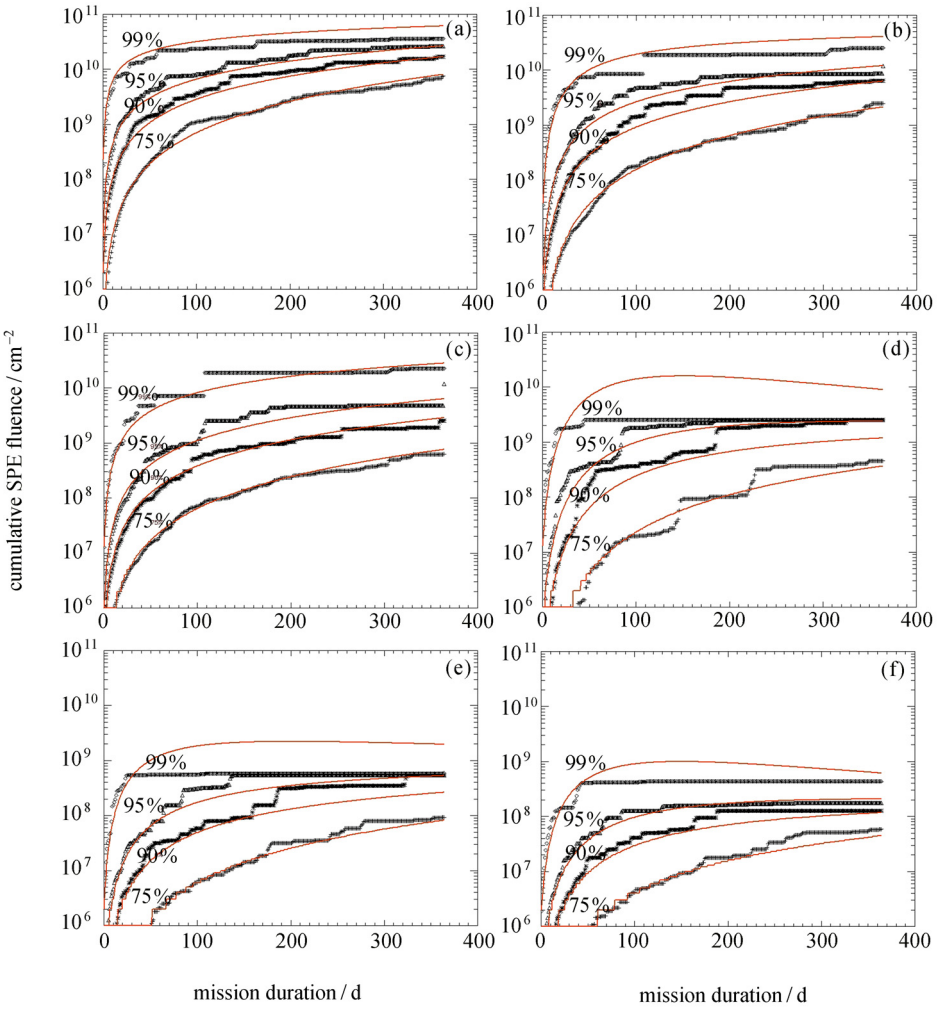

图 4 不同置信度下模型预测与实际观测结果. 红线为对应 4 个置信度下的模型预测结果. (a) (b) (c) 分别为太阳活跃年能量 > 10 MeV, > 30 MeV, > 60 MeV 的质子通量模型预测与实测结果的对比; (d) (e) (f) 分别为太阳平静年能量 > 10 MeV, > 30 MeV 和 > 60 MeV 的质子通量模型预测与实测结果的对比

Fig. 4 Comparison between the model forecast results and the observation with the confidence levels of 99%, 95%, 90% and 75%. The red lines are the forecast results. (a) (b) and (c) are the comparisons for the proton fluences whose energy is greater than 10 MeV, 30 MeV and 60 MeV in solar active years; (d) (e) and (f) are the comparisons for the proton fluences whose energy is greater than 10 MeV, 30 MeV and 60 MeV in solar quiet years

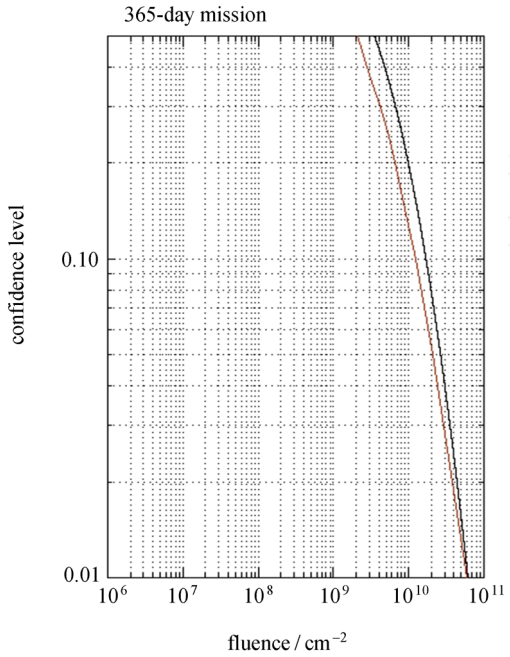

图 5 太阳活跃年任务期为一年时本文模型预测结果 (黑线) 与 JPL 模型预测结果 (红线)

Fig. 5 Model forecast results of this paper and JPL model within 365-day period in solar active years

所示. 图 5 中红线为 JPL 模型的预测结果, 黑线是本文模型的预测结果. 从图 5 中可以看出, 本文模型预测与 JPL 模型预测差别不大. 在相同置信度水平下, 本文模型预测的能量 $>$ 10 MeV 的太阳质子通量高于 JPL 模型预测的结果. 而随着置信度的增加 (纵轴概率减小), 二者差别变小. 例如, 当置信度为 99% 时, 本文模型预测的 10 MeV 太阳质子通量为 $6.12\times10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$, JPL 模型预测的结果为 $5.88\times10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$, 二者差别基本可以忽略.

4 结论

利用 1967−2014 年共 48 年的太阳高能粒子观测数据, 通过经验统计的方法, 确认太阳活跃年和太阳平静年期间 1−365 天不同时间段能量 $>$ 10 MeV, $>$ 30 MeV 和 $>$ 60 MeV 的质子通量分布基本符合对数正态分布, 且通量对数的标准偏差 σ 和期望值 μ 随时间的变化满足对数函数形式. 以此为基础构建了一个太阳质子通量中短期预报模型. 该模型能够给出 50% 以上置信度下, 1−365 天不同航天任务期内能量 $>$ 10 MeV, $>$ 30 MeV 和 $>$ 60 MeV 的太阳质子通量, 即能够为航天器执行中短期任务提供可能遭遇的太阳质子事件通量水平, 为航天器的抗辐射加固设计和航天员的出舱防护提供重要依据.

此外, 对太阳质子通量模型预测结果与实测结果进行了对比. 模型预测整体与实测结果符合较好, 低置信度水平下的模型预测与实测符合程度好于高置信度水平下的模型预测与实测符合程度, 较短任务期时间内模型预测与实测符合程度好于较长任务期时间内模型预测与实测符合程度. 研究结果可以为太阳质子事件中短期预报模型的应用提供指导.

参考文献

[1] REAMES D V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1999, **90**: 413-491

[2] REAMES D V. The two sources of solar energetic particles [J]. *Space Sci. Rev.*, 2013, **175**: 53-92

[3] CANE H V, ROSENVINGE T, VON T, *et al.* Two components in major solar particle events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(12): 8017-8021

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

[5] FEYNMAN J, ARMSTRONG T P, DAO-GIBNER L, *et al.* New interplanetary proton fluence model [J]. *J. Spacec.*, 1990, **27**: 403-410

[6] FEYNMAN J, SPITALE G, WANG J. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 13281-13295

[7] XAPSOS M A, SUMMERS G P, SHAPIRO P, *et al.* New techniques for predicting solar proton fluences for radiation effects applications [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(6): 2772-2777

[8] XAPSOS M A, SUMMERS G P, BURKE E A. Extreme value analysis of solar energetic proton peak fluxes [J]. *Solar Phys.*, 1998, **183**: 157-164

[9] XAPSOS M A, SUMMERS G P, BURKE E A. Probability model for peak fluxes of solar proton events [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1998, **45**(6): 2948-2953

[10] XAPSOS M A, SUMMERS G P, BARTH J L, *et al.* Probability model for worst case solar proton event fluences [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1999, **46**(6): 1481-1485

[11] XAPSOS M A, SUMMERS G P, BARTH J L, *et al.* Probability model for cumulative solar proton event fluences [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1999, **47**(3): 22-26

[12] XAPSOS M A, BARTH J L, STASSINOPOULOS E G, *et al.* Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects application [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, **47**(6): 2218-2223

[13] NYMMIK R A. Averaged energy spectra of peak flux and fluence values in solar cosmic ray events [J]. *Proc. 23th*

ICRC, 1993, **3**(9): 29-32

[14] LI Tingting, SHI Liqin, LIU Siqing. Research on the solar proton fluence model [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(3): 205-210 (李婷婷, 师立勤, 刘四清. 太阳质子通量模型研究 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(3): 205-210)

[15] WANG Jialong, ZHANG Xunjie, HUANG Zerong. A neural network method for solar proton events warning [J]. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 1999, **19**(3): 318-323 (王家龙, 张训械, 黄泽荣. 神经网络方法用于太阳质子事件警报 [J]. 天文和天体物理学报, 1999, **19**(3): 318-323)

[16] GONG Jiancun, XUE Bingsen, LIU Siqing, *et al*. Short-term prediction of solar proton events by neural network method [J]. *J. Space Sci.*, 2004, **28**(2): 166-173 (龚建村, 薛炳森, 刘四清. 神经网络方法在太阳质子事件短期预报中的应用 [J]. 空间科学学报, 2004, **28**(2): 166-173)

[17] CUI Yanmei, LIU Siqing, WANG Huaning. Application of solar photospheric magnetic field properties in SPE short-term forecast [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(2): 97-104 (崔延美, 刘四清, 王华宁. 太阳光球磁场特征物理量在质子事件短期预报中的应用 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(2): 97-104)

[18] LI Rong, CUI Yanmei. SPE short-term prediction model with machine learning method [J]. *Sci. China*: *Phys., Mech. Astron.*, 2010, **40**(7): 938-944 (李蓉, 崔延美. 应用机器学习方法的太阳质子事件短期预报模型 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2010, **40**(7): 938-944)

[19] CUI Yanmei, LI Rong, LIU Siqing. SPE short-term forecast with photospheric magnetic field properties and traditional forecast factors [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4): 436-440 (崔延美, 李蓉, 刘四清. 结合光球磁场特征物理量的质子事件短期预报 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4): 436-440)

[20] HECKMAN G R, KUNCHES J M, ALLEN J H. Prediction and evaluation of solar particle events based on precursor information [J]. *Adv. Space Res.*, 1992, **12**(2/3): 313-320

[21] CHRISTOPHER C B. SEC proton prediction model: verification and analysis [J]. *Radiat. Meas.*, 1999, **30**: 231-250

[22] CHRISTOPHER C B. Updated verification of the Space Weather Prediction Center's solar energetic particle prediction model [J]. *Space weather*, 2008, **6**: S01001. DOI: 10.1029/2007SW000337

[23] SMART D F, SHEA M A. PPS76: a computerized event mode solar proton forecasting technique [C]// NOAA Solar-Terrestrial Predictions Proceedings, Boulder: NOAA, 1979: 406-427

[24] SMART D F, SHEA M A. PPS-87—A new event oriented solar proton prediction model [J]. *Adv. Space Res.*, 1989, **9**(10): 281-284

[25] SMART D F, SHEA M A. Modeling the time-intensity profile of solar flare generated particle fluxes in the inner heliosphere [J]. *Adv. Space Res.*, 1992, **12**(2/3): 303-312

[26] KAHLERA S W, CLIVERA E W, LINGB A G. Validating the proton prediction system (PPS) [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2007, **69**: 43-49

[27] XIONG Senlin, CUI Yanmei, LIU Siqing. Research on solar proton event warning with observation data of ACE satellite [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4): 387-395 (熊森林, 崔延美, 刘四清. 利用 ACE 卫星数据对太阳质子事件预警方法的研究 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(4): 387-395)

[28] CUI Yanmei, SHI Liqin, LIU siqing. Study on forecast of solar proton event fluence during short and medium term missions [J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(6): 597-602 (崔延美, 师立勤, 刘四清. 中短期太阳质子事件通量的预报研究 [J]. 载人航天, 2015, **21**(6): 597-602)