0254-6124/2012/32(6)-771–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Guo Ce, Xue Bingsen, Lin Zhaoxiang. Study for prediction method of X-ray flare characteristic parameters. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 771-777

太阳 X 射线耀斑特征参数预报方法研究 *

郭 策[1] 薛炳森[2] 林兆祥[1]

1(中南民族大学电子信息工程学院 武汉 430074)

2(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 太阳耀斑是重要的空间天气事件, 有关太阳耀斑参数的预报对于电离层突然骚扰 (SID) 影响的评估具有实用意义. 本文采用 GOES-8 卫星上第 23 太阳周软 X 射线通量的数据, 通过数值拟合的方法对 X 级耀斑强度的峰值以及 X 级耀斑的结束时间进行预测. 利用这种方法对第 23 太阳周中的 X 级耀斑进行分析, 最多可以提前 17 min 预测出 X 级耀斑的峰值, 在预测 X 级耀斑结束时间时, 预测的 X 级耀斑结束时间最多可以提前 60 min 左右, 从预报结果来看, 预报方法具有一定的有效性和实用性.

关键词 软 X 射线通量, X 级耀斑, 数据拟合, 预报结果

中图法分类号 P 353

Study for Prediction Method of X-Ray Flare Characteristic Parameters

GUO Ce[1] XUE Bingsen[2] LIN Zhaoxiang[1]

1(*Electronic and Information Engineering Institute, South-Center University for Nationalities, Wuhan* 430074)

2(*National Satellite Meteorology Center, Beijing* 100081)

Abstract Solar flares are important space weather events, and prediction for the parameters of them is important to the warning of Sudden Ionospheric Disturbance (SID). It is well known that the revolution of solar soft X-ray flares follows some pattern, especially the long duration ones. Through events analysis, it is found that the early stage of rising phase of the solar flare always indicates the peak flux. After checking the process of recent events, the pattern of flare flux developing become clear that the flux rising rate decreases continuously until it reaches the peak. To simulate this process, a mixed fitting model was built and the basic idea represents that when the time data of X-ray is supplied to the model, relative prediction result could be derived from each group of data. When the difference between adjacent two is within point scale, the fitting parameter is then determined and stored in the model. The prediction of the flare will be made with these parameters. Evaluation of the model was done with the big flare in the 23rd solar cycle and the result is acceptable with the error less than 20% and the peak time could also be well predicted. The decreasing phase of the flare

* 公益性气象行业专项项目资助 (GYHY200906013)

2011-05-05 收到原稿, 2011-10-20 收到修定稿

E-mail: guoce888@163.com

was also investigated. Result showed that most of the flares go down following a minus e-fold pattern. Although the appearance of each flare is different, its decreasing curve could be simulated with the data after peak time. The fitting parameters would be derived through 10 data points. The result of the fitting model indicates that the ending time of flare could be well predicted. Judged from the forecast results with historic data, the prediction method has a certain validity and practicability. The dynamic fitting model was also tested with newly occurred flare. The size and peak time were well predicted, which proved that the method could be applied to prediction practically.

Key words Soft X-ray flux, X-Class flares, Data fitting, Forecast results

0 引言

太阳耀斑爆发是太阳大气 (主要在色球和日冕) 局部区域突然释放出巨大能量和物质的过程, 耀斑爆发过程中会伴随有可见光、紫外线、远紫外和 X 射线及 γ 射线等波段的电磁辐射, 还会伴随有电子、质子、离子和中子等物质的发射, 是耀斑能量释放在不同层次的外在表现 [1]. 大的太阳耀斑往往对地球环境有很大影响, 因而对于耀斑变化过程的预测受到广泛关注.

由于耀斑爆发期间 X 射线波段增长明显, 而且与物质喷发的日冕层联系密切 [2], 近年来, 国际上大多采用 X 射线通量对耀斑进行分级. 耀斑爆发期间, 局部日冕电子可被加热到 4×10^7 K 以上, 高温日冕电子可通过热韧致辐射发出 X 射线, 产生 X 射线耀斑, 其峰值波长在 $10\sim100$ nm, 特点是上升时间非常短, 而下降时间相对较长, 一般持续 $10\sim60$ min. 由于美国 GOES 卫星探测时间长, 数据稳定, 另外美国空间天气预报中心 (SWPC) 已经形成了耀斑定级的业务产品, 因此, 目前国际上普遍公认以 GOES 卫星 $0.1\sim0.8$ nm 波段的积分流量作为 X 射线耀斑的分级标准. 其将 X 射线耀斑以软 X 射线的峰值通量为依据划分为 A, B, C, M, X 五个等级, A 级的积分流量为 10^{-8} W·m^{-2}, 每级相差 10 倍, 每个级别又以数字标记, 例如, 峰值通量为 3.4×10^{-5}W·m^{-2} 的耀斑即为 M3.4 级. 中国气象局也制订了太阳 X 射线分级的行业标准, 基本沿用了这一分级方法, 这里所做的预测只是针对影响最大的 X 级耀斑来进行的.

太阳耀斑爆发期间, 由于紫外和 X 射线波段辐射明显增强, 使向日面电离层的电离度增加, 对通信造成不利影响, 这种电离层突然骚扰 (SID) 所带来的最为明显的效应是短波信号吸收的增加. 电离层 D 层位于 $90\sim110$ km 高度, 耀斑发生时, 向阳面的中性气体会吸收 X 射线, 电离度增大, 穿过 D 层的无线电波的能量会被自由电子部分吸收, 特别是短波波段, D 层所吸收的程度会不断增大, 造成短波通信质量下降, 严重时短波信号会被完全吸收, 导致短波中断 (Blackout) 事件 [4]. 因此, 预报耀斑峰值和下降过程可以有效应对太阳耀斑爆发造成的电离层突然骚扰事件.

由于 X 射线耀斑是整个耀斑过程的重要组成部分, 且与日冕中的粒子加速过程密切相关 [5], 因此, X 射线耀斑的特征也是判断粒子加速及其可能对地效应的重要线索. 在没有 SOHO 影像资料的条件下, X 射线耀斑的持续时间是判断 CME 发生的重要判据. Reames 等 [6] 统计表明, 太阳质子事件大部分对应着强的 X 射线耀斑事件, 且 X 射线耀斑的持续时间均超过了 19 min. Matthews 等 [7] 对 SOHO 卫星的 CME 探测结果与太阳耀斑的强度和持续时间等特征进行了统计分析, 结果显示, 对于未发生 CME 的耀斑, 耀斑强度与耀斑持续时间是成明显正比关系的, 而有 CME 伴随的耀斑, 持续时间一般都会比较长, 与耀斑强度没有明显关系. 因此, 对 X 射线耀斑强度和持续时间的预测可以为 CME 的认证提供一个量化指标.

综上所述, 对 X 射线耀斑发展过程的预报在空间天气领域具有重要作用. 目前, 对 X 射线耀斑的研究多集中在爆发原理和产生机制方面, 对耀斑 X 射线流量变化特征的研究和特征参数的预报方法则涉及很少.

1 数据和方法

通常, 耀斑的爆发过程可分为预耀斑相、爆发相

和渐变相三个相连的位相 [3], 在 X 射线波段, 流量的变化也大致如此, 如图 1 所示. 图 1 中的 A 区域, X 射线流量开始缓慢增长, 对应着预耀斑相; B 区域对应的是爆发相, X 射线流量加速上升, 即将到达峰值时, 通量增幅开始下降, 大致呈 S 形. 图 1 中 C 和 D 区域对应耀斑的渐变相, 将这一阶段划分为两个区间是因为考虑到 C 区间 X 射线流量呈加速下降的趋势, 而在 D 区间, 下降速度趋缓, 这样划分有利于进行曲线拟合和流量预报.

太阳 0.1 ∼ 0.8 nm 波段的 X 射线流量作为耀斑大小的定级标准已经得到了比较广泛的认同, 这里采用 GOES-8 卫星的监测数据, 选取第 23 太阳周探测到的 X 级耀斑进行研究. 通过大量的 X 级耀斑期间 X 射线形态统计分析可以发现, 太阳 X 射线流量的演化过程均具有图 1 所示的特征, 即具有明显的三个阶段, 这就使得通过解析方式模拟 X 射线的通量演化, 预报 X 级耀斑特征参量成为可能. 本文主要通过 X 级耀斑期间 X 射线通量随时间的变化, 构建 X 射线通量演化模型, 进而对 X 级耀斑峰值、结束时间等关键特征参量进行预报.

1.1　峰值预测

具体分析上升阶段的 X 射线流量, 可以发现多数太阳耀斑上升阶段 X 射线流量的变化具有共同特征, 基本上可以将耀斑爆发相分为加速上升和持续上升两个阶段. 加速上升阶段可表示为 $\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} > 0$, $\frac{\mathrm{d}^2 f}{\mathrm{d}t^2} > 0$, 这里 f 表示 X 射线流量, 该阶段末期,$\frac{\mathrm{d}^2 f}{\mathrm{d}t^2} \approx 0$. 持续上升阶段可表示为 $\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} > 0$, $\frac{\mathrm{d}^2 f}{\mathrm{d}t^2} < 0$, 在此阶段, X 射线流量仍在上升, 但增长速度开始减小, 直到 $\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \approx 0$, 达到峰值.

一般情况下, 在加速上升段, 无法判断耀斑达到峰值. 实际计算时, 也不能得到峰值的预报值. 只有上升速度开始下降后, 即进入持续上升阶段, 才有可能根据其下降的速度变化来预测流量增速为零 (峰值) 的流量大小.

为了模拟 X 级耀斑强度的上升过程, 预报 X 级耀斑强度的峰值, 可以采用以下公式:

$$f = p_1 + p_2 t + p_3 t^{0.8} + p_4 \lg(t)/t + p_5 \exp(-t). \quad (1)$$

其中, t 为时间, 单位 min; f 为 X 射线通量扩大 10^4 倍后的值, X 射线通量的单位是 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$; $p_1 \sim p_5$ 为需要通过拟合来得出的参数.

由于耀斑的爆发过程是比较短的, 需要用最短的时间做出最准确的预测. 在实际模拟中, 将不同长度的时间窗口进行了大量的试验和比较. 通过统计发现, 8 min 是能够得出较为准确拟合结果的最少时间, 预报的效果能够满足误差要求, 因此选用了 8 min 的滑动窗口. 每次预报时, 时间窗口向前滑动一步, 并以这 8 个点来推导拟合函数中的 5 个参数, 进而以这一公式来推导出耀斑的峰值情况, 经过判断, 最后确认耀斑峰值的预报值. 其过程如图 2 所示.

以上预报流程与耀斑预警业务的过程相似, 每分钟的实时监测数据到达后, 与前 7 min 的数据构成预

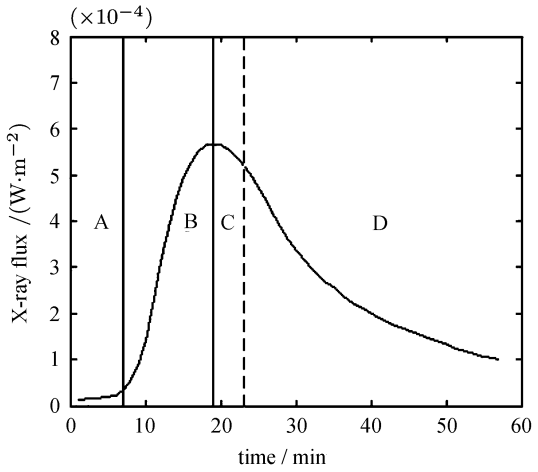


图 1　X 级耀斑的上升和下降过程

Fig. 1　X-Class flare's process of the rise and fall

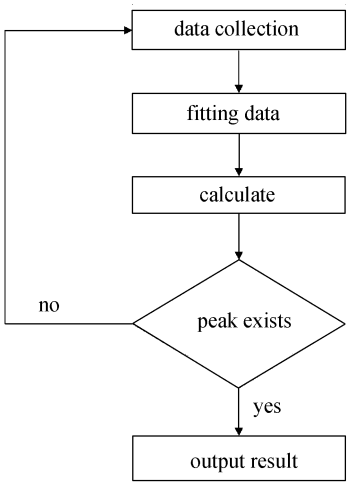


图 2　推导 X 级耀斑峰值强度流程

Fig. 2　Flow chart of how to derive X-Class flare's peak

报数据集, 驱动预报模型进行预报, 如果模型无法判断, 则需要等待新数据的到来, 重新启动这一过程, 直到模型能够预报耀斑峰值为止. 其中, 模式运行的关键环节是判断计算结果是否能够用于耀斑峰值的预报. 通过大量实验可以发现, 采用式 (1) 对耀斑上升过程进行拟合, 均能够得到一个耀斑峰值, 但许多情况下, 计算得到的耀斑峰值出现在 60 步以外, 即计算的耀斑上升时间超过 1 h, 这显然是不合理的结果. 另外还发现, 随着采用的持续上升阶段数据的增多, 预报精度反而呈下降趋势. 通过对 2000−2004 年全部 X 级耀斑的计算和统计, 第一次出现峰值所对应的时间在 25 min 以内 (以第一个拟合数据时间作为第一分钟), 模型计算出的峰值大小即是 X 耀斑的峰值预报结果. 经过统计还发现, 并不是滑动窗口越接近峰值拟合效果就越好, 因为随着滑动窗口逐渐接近峰值, 拟合曲线的峰值有一个逐渐减小的趋势, 在第一次出现所需要的峰值后若再将拟合数据靠近峰值进行拟合, 会出现拟合峰值比实际峰值小的情况, 这与所采用的拟合函数有关.

针对 2001 年 4 月 3 日的 X 级耀斑, 采用上面介绍的峰值预测方法对耀斑的峰值进行预测. 图 3 ∼ 5 给出的是依次外推得到的拟合结果 (图像纵坐标单位是 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$). 图 3 和图 4 显示的是采用 2001 年 4 月 3 日 X 级耀斑事件的实测数据, 依据式 (1) 进行模拟计算得出的图像. 其中, 图 3 从 03:38 UT 开始采集数据, 图 4 从 03:39 UT 开始采集数据, 经计算峰值出现的时间都在 30 min 以后. 而图 5 是从 03:40 UT 开始采集数据的, 经计算预测得到的峰值发生在第 20 分钟, 这是第一次拟合出的峰值所对应的时间在 25 min 以内, 按照前面峰值预测方法提到的标准, 采用此次结果作为最终预报结果. 经检验可以看出, 模式计算的预测峰值通量为 $1.26\times10^{-4}\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, 而实际峰值通量为 $1.24\times10^{-4}\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, 由此得出预测结果的相对误差为 1.6%, 预测结果较为理想.

根据上述 X 级耀斑峰值强度的预报过程, 提出了一个太阳耀斑峰值强度的预报模型, 表 1 给出的是

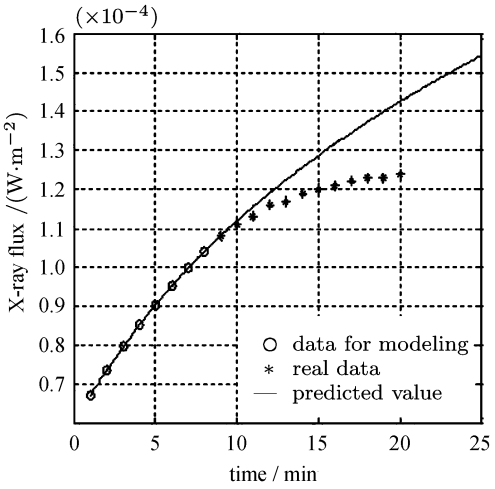


图 3 采用 03:38 UT 开始的数据拟合结果

Fig. 3 Fitted results using the data beginning at 03:38 UT

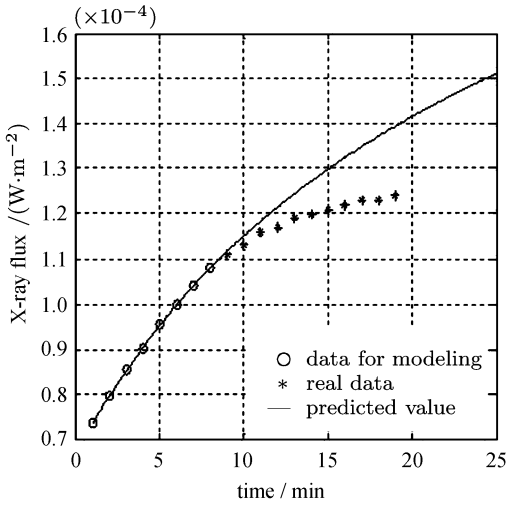


图 4 采用 03:39 UT 开始的数据拟合结果

Fig. 4 Fitted results using the data beginning at 03:39 UT

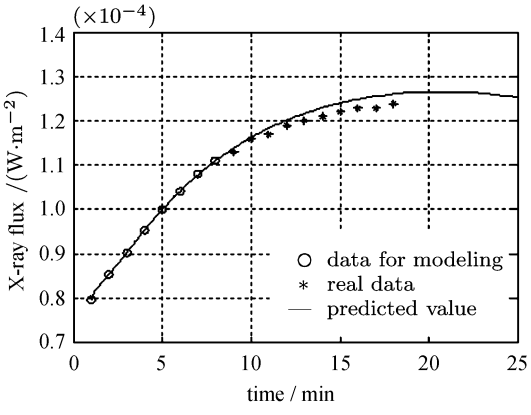


图 5 采用 03:40 UT 开始的数据拟合结果

Fig. 5 Fitted results using the data beginning at 03:40 UT

应用该模型对 2001−2003 年 X 级耀斑峰值强度进行预测所得到的结果, 表 1 选取的均为耀斑上升阶段时间大于 8 min 的数据, 这是因为需要足够多的提前量才能对峰值的大小做出预测.

从表 1 可以看出, 采用我们的预报模型对耀斑峰值强度的预测精度较高, 而且一般提前量均在 8 min 以上. 但也有少数例外, 这些事件的共同特点是耀斑在 5~6 min 内达到峰值, 模式输入采样点数量不足, 无法进行计算. 根本原因是目前国际公开数据的时间分辨率较低 (仅 1 min), 随着中国自主的太阳 X 射线监测仪的部署, 这一问题将得到解决.

1.2　X 级耀斑结束时间预测

在 X 级耀斑的衰减期, X 射线流量从峰值开始呈加速下降趋势, 数分钟后, 流量下降的速度达到一个峰值后开始减小. 经过对多次耀斑爆发过程的比较发现, 在衰减期的最初几分钟 (即图 1 中的 C 区), 耀斑变化没有固定的规律, 通量下降速度达到最大, 即 $\frac{\mathrm{d}^2 f}{\mathrm{d}t^2} \approx 0$ 后, 开始进入 D 区, 该时段通量变化较为规则, 通量随时间的变化可用

$$f = a\,\mathrm{e}^{bt} \tag{2}$$

表 1　2001, 2002, 2003 年 X 级耀斑峰 X 射线通量值 ($\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$) 的预测情况

Table 1　Predictions of the X-ray flux of X flares peak in 2001, 2002 and 2003

年–月–日	预测峰值 ($\times10^{-4}$)	实际峰值 ($\times10^{-4}$)	相对误差 /(%)
2001-03-29	2.35	1.97	19.2
2001-04-02	1.22	1.21	0.8
2001-04-03	1.25	1.23	1.63
2001-04-10	2.5	2.3	8.7
2001-04-12	2.7	2.25	20
2001-10-25	1.53	1.48	3.38
2001-11-04	1.15	1.10	4.5
2002-04-21	1.59	1.54	3.25
2002-07-20	3.36	3.37	0.3
2002-08-24	5.10	5.11	0.2
2003-10-23	5.69	5.58	0.18
2003-10-26	1.38	1.37	0.7
2003-10-28	19.5	18.4	6
2003-10-29	12	10.8	11
2003-11-03	3.09	3.03	1.98

来拟合. 其中, t 为时间, 单位 min; f 为 X 射线通量; a 和 b 是需要通过拟合得出的参数. 通过多次试验比较, 将拟合所用的数据定为 D 区前 5 min 的 X 射线通量. 从评估耀斑引发的 SID 事件的实际应用出发, 对于 X 级耀斑, 这里将耀斑结束的标志定为 M5 级, 即 0.1~0.8 nm 波段 X 射线流量小于 $5\times10^{-5}\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ 时, 本次耀斑结束.

以 2005 年 1 月 20 日的数据为例, 这次耀斑从 07:01 UT 达到峰值开始一直到 08:33 UT 峰值通量达到 $5\times10^{-5}\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ 为止, 减弱过程持续 93 min, 图 6 给出的是该次耀斑峰值开始时 X 射线流量的变化速度 (只应用了前 65 min 的数据).

由图 6 可以看出, 耀斑衰减期 X 射线流量下降速度变化呈现先迅速增大, 然后缓慢降低的特征, 以峰值通量达到最大值处为起点, 第 10 分钟是斜率最大的时间点, 即 $\frac{\mathrm{d}^2 f}{\mathrm{d}t^2} \approx 0$ 处, 这里拟合所用数据起始点从该点开始, 取其后的 5 个连续采样数据进行拟合得到图 7 所示的曲线, 然后再以第 9 分钟为起点取 5 组数据进行拟合得到图 8 所示曲线, 比较图 7 和图 8, 两曲线的吻合程度较好, 因此就将拟合数据选定为从第 10 分钟到第 14 分钟的 5 组软 X 射线通量, 即图 7 就是我们所要的拟合图像.

从图 7 可以看出, 以拟合起点为第 1 分钟, 则实际的耀斑结束时间为第 85 分钟, 而预测的耀斑结束时间为第 78 分钟, 误差为 3 分钟, 相对误差为 8.24%, 结果较为理想.

应用这种方法, 对 2003 年的 X 耀斑结束时间做了一次统计, 结果列于表 2.

从表 2 中可以看出, 大部分耀斑 (7/9) 结束时间的预测误差较小, 但对 2003 年 10 月 28 日和 2003 年

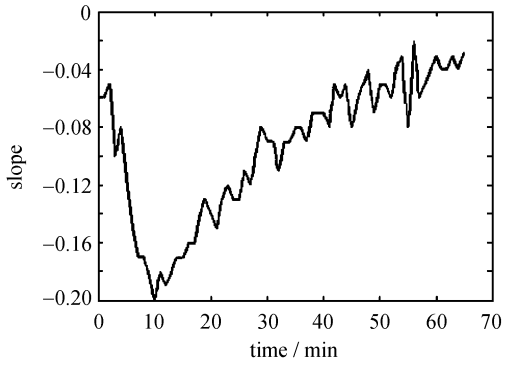


图 6　软 X 射线通量曲线斜率

Fig. 6　Soft X-ray flux curve slope

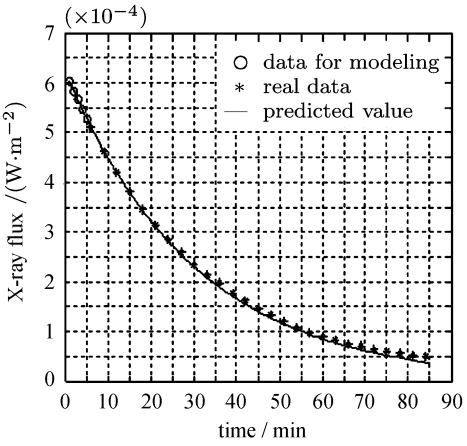


图 7 采用 07:10 UT 开始的数据拟合的曲线

Fig. 7 Fitted curve using the data beginning at 07:10 UT

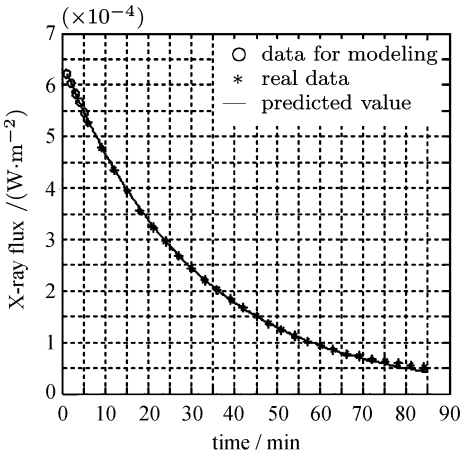


图 8 采用 07:09 UT 开始的数据拟合曲线

Fig. 8 Fitted curve using the data beginning at 07:09 UT

表 2 2003 年 X 耀斑结束时间进行预测的结果

Table 2 Result of prediction of the X flare's end time in 2003

月–日	预测结束时间/min	实际结束时间/min	相对误差/(%)
05-28	27	30	10
06-15	26	31	16.1
10-23	38	50	24
10-26	35	40	12.5
10-28	60	126	52.4
10-29	35	49	28.5
11-02	37	47	21.3
11-03	24	28	14.3
11-04	50	107	53.3

11 月 4 日耀斑的结束时间预测误差较大, 其原因是该时段太阳 X 射线的背景较高, X 级耀斑后期叠加了若干 M 级耀斑, 由于这种时延多发生在后期, 通量处在 M 级, 对 SID 评估的影响较小.

1.3 应用举例

在对耀斑过程分析的基础上, 建立了一种对耀斑强度峰值和结束时间进行预报的模式, 该模式对历史事件的回测结果较好, 可在实际业务中进行应用.

2011 年 2 月 15 日的 X 级耀斑是第 24 太阳活动周开始以来最大的一次耀斑, 由于耀斑时段中国地区正处在向阳面, 短波通信受到显著干扰. 此次耀斑中, 爆发相只有 5 min, 因而无法进行耀斑峰值预报. 耀斑的衰减段从峰值时间 01:56 UT 开始到 02:18 UT X 射线通量达到 5×10^{-5} W·m^{-2} 结束, 共持续 23 min, 流量变化速度如图 9 所示.

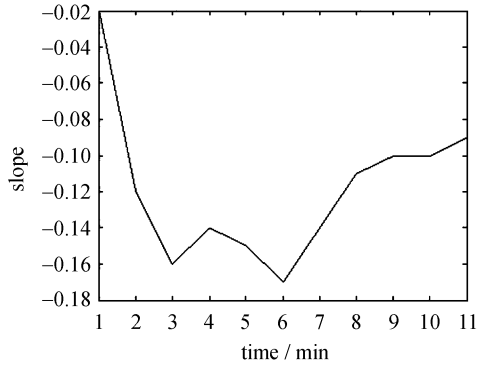


图 9 软 X 射线通量曲线斜率

Fig. 9 Soft X-ray flux curve slope

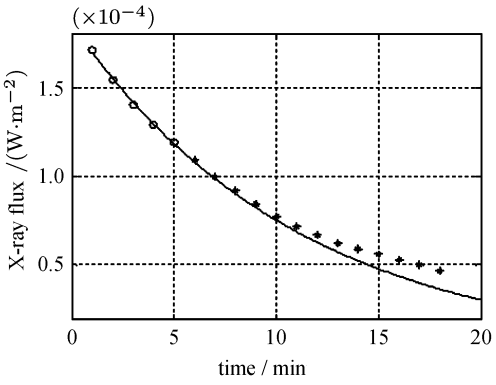


图 10 以 02:00 UT 为起始拟合数据的拟合曲线与实际数据的比较

Fig. 10 Comparison of actual data and fitted curve using the data that begins at 02:00 UT

从图 9 中可以看到, 在第 6 分钟 X 射线流量下降速度达到最大值, 这里取该时间开始的五个连续流量数据对耀斑的衰减过程进行模拟计算, 结果如图 10 所示.

由图 10 可以看出, 实际的 X 耀斑结束时间是第 18 分钟, 而预测的耀斑结束时间是第 15 分钟, 相对误差为 16.7%, 结果较为理想.

2 结论与讨论

尽管太阳 X 射线耀斑的形成机制还有待深入研究, 但 X 射线耀斑演化过程确实存在一些固有的特征. 通过统计分析耀斑发展过程, 研究发现了耀斑在爆发相和衰减相的一些共有特点, 并在此基础上提出了有关 X 级耀斑流量峰值和结束时间的预测方法, 并建立了预报模型软件. 通过反复试验, 选择式 (1) 来拟合耀斑的爆发相过程, 预报耀斑流量峰值, 选择式 (2) 来拟合耀斑的衰减相, 预报耀斑结束时间, 取得了较好的结果.

通过数值拟合的方法对 X 级耀斑峰值以及 X 级耀斑结束时间进行预测, 可以更深入地研究太阳耀斑过程的各种特征参数与 CME 及质子事件等重要空间天气事件的相关特性, 研究各类事件先兆特征因子的预报及警报. 此外, 通过对耀斑过程的模拟, 可进一步研究耀斑所伴随的电离层响应的评估和预报.

需要指出的是, 本文提出的预报方法和模型仍有待改进, 这一方面需要更多的研究样本, 另一方面需要时间分辨率足够高的自主实时数据的支持. 中国风云二号卫星得到的太阳 X 射线数据将为研究新的太阳耀斑参数预报方法提供依据.

致谢 美国空间天气预报中心 (SWPC) 为本工作提供了太阳 X 射线探测数据.

参考文献

[1] Kamide Y. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment [M]. Beijing: Science Press, 2010. In Chinese (Kamide Y. 日地环境指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2010)

[2] Zhou Guiping, Cao Zhuoliang, Wang Jingxiu. Correlation between coronal mass ejection and solar surface magnetic activities [J]. *Prog. Astron.*, 2003, **21**(1):41-54. In Chinese (周桂苹, 曹卓良, 汪景琇. 日冕物质抛射和太阳表面磁活动的关系 [J]. 天文学进展, 2003, **21**(1):41-54)

[3] Fang Cheng. Physics of Solar Active Regions [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2008. 56-59. In Chinese (方成. 太阳活动区物理 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2008. 56-59)

[4] Lin Yunzhang. The Solar Physics Introduction [M]. Beijing: Science Press, 2000, 542-545. In Chinese (林云章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000. 542-545)

[5] Tu Chuanyi. Solar-Terrestrial Space Physics [M]. Beijing: Science Press, 1988. 43-48. In Chinese (涂传诒. 日地空间物理 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 43-48)

[6] Tylka A J, Boberg P R, Cohen C M S, *et al.* Flare-and shock-accelerated energetic particles in the solar events of 2001 April 14 and 15 [J]. *Astrophys. J.*, 2002, **581**:119-123

[7] Green L M, Matthews S A, Driel-Gesztelyi Van L, *et al.* Multi-wavelength observations of an X-class flare without a coronal mass ejection [J]. *Solar Phys.*, 2002, **2**(205):325-339