

# 耀斑软X射线流量的统计性质\*

张 平<sup>1,2,3†</sup> 刘四明<sup>1,2‡</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院暗物质和空间天文重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 为了更定量地研究太阳耀斑软X射线辐射的统计性质, 发展了一套对于给定峰值流量区间的耀斑的自动识别程序, 并用它分析了从1980年到2013年GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite)在两个软X射线波段上对太阳耀斑的观测. 研究发现耀斑软X射线流量在峰值附近变化的统计特征和耀斑流量峰值的绝对大小无关: 平均而言耀斑流量的上升时间约是下降时间的一半, 而且高能量通道的上升和下降时间比相应的低能量通道时间要短, 但是这些时间还是会随着耀斑流量变化幅度的增加而增加.

**关键词** 太阳: 耀斑, X射线, 方法: 统计

**中图分类号:** P182; **文献标识码:** A

## 1 引言

耀斑统计性质研究中一个比较大的不确定性来自于对耀斑(特别是小耀斑)的识别<sup>[1-5]</sup>, 然而考虑到太阳对日地环境的影响和耀斑的大小关系密切, 对大耀斑统计性质的研究更具有实际意义. 在耀斑的统计研究中, 对于较容易获取的耀斑的光变特性及相应时标的分析具有重要意义. 耀斑光变时标和爆发时主导的物理机制密切相关, 它们也是空间天气预报建模的基础<sup>[6-8]</sup>.

美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)下属的国家环境卫星、数据和信息服务中心(National Environmental Satellite, Data, and Information Service)运行着一系列地球同步轨道环境卫星GOES, 它们搭载的X射线探测器提供了迄今为止最完整的耀斑软X射线流量的观测数据. 自从1974年首颗GOES卫星发射以来, 这些X射线探测器已经在 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 和 $0.5 \sim 4 \text{ \AA}$ 两个软X射线波段上几乎连续地采集了时间分辨率在 $2 \sim 3 \text{ s}$ 的近40 yr的数据. 基于 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 波段耀斑峰值流量的大小而划分的耀斑等级是目前普遍采用的耀斑大小的衡量标准. 以前对于耀斑软X射线流量统计性质的研究也主要是利用 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 波段的流量数据.

2014-05-24收到原稿, 2014-07-17收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11173064, 11233008)和中科院战略性先导科技专项(XDB09000000)资助

<sup>†</sup> zhangping@pmo.ac.cn

<sup>‡</sup> liusm@pmo.ac.cn

描述耀斑特征的很多参数呈现出无特征尺度的幂律形式的频数分布,这一结果与自组织临界(Self-Organized Criticality)现象非常相似<sup>[7,9-11]</sup>. 自组织临界现象中大小事件在统计性质上完全相似,从而保证了有关参量频数分布的幂律函数形式. 但是在对耀斑详细的多波段观测分析中,人们发现产生大耀斑的物理机制似乎与小耀斑的产生机制有所不同: 伴随大耀斑的爆发,通常有日冕物质抛射的发生; 很多大耀斑还表现出双带的耀斑环系结构. 另外根据耀斑脉冲相X射线流量的上升快慢,人们把耀斑分为缓变与脉冲两类. 耀斑软X射线辐射的统计性质是否与软X射线的峰值流量有关还有待通过更定量的分析来澄清.

在这篇文章中,我们发展了一套对于给定峰值流量区间的耀斑的识别程序. 它避开了传统耀斑识别方法对背景流量的依赖,可以用来分析大耀斑(特别是耀斑流量在峰值附近)的变化特征. 利用这一程序,我们分析了GOES卫星在两个软X射线能段上对太阳耀斑的几十年的观测数据: 我们不仅再现了不同等级耀斑的爆发频率对太阳周期的依赖; 还对不同等级耀斑在峰值附近的行为进行了比较研究. 在第2节中,我们总结了GOES数据的基本特征并讨论了耀斑的识别程序; 第3节给出了分析的结果; 在第4节我们做了简短讨论并给出了结论.

## 2 GOES数据的基本特征和耀斑的识别判据

地球同步轨道系列环境卫星GOES由美国国家海洋和大气管理局运行,主要用于天气预报、地球空间环境监测和气象学的研究. 它们上面携带的X射线探测器从1974年开始到现在持续观测太阳软X射线的辐射流量,各个阶段服役的GOES卫星见表1. 在有些时间段会有多颗GOES卫星同时运行,有关数据可以用来估计仪器效应带来的不确定性<sup>[12-13]</sup>. 软X射线探测器主要在 $0.5 \sim 4.0 \text{ \AA}$  和  $1.0 \sim 8.0 \text{ \AA}$  两个波段监控来自全日面的辐射<sup>[14]</sup>,并且基于 $1.0 \sim 8.0 \text{ \AA}$  波段峰值流量的大小,耀斑可以划分为A、B、C、M、X 5等级(见图1左图右侧坐标轴的标注),它们对应的峰值流量区间分别是 $[10^{-8}, 10^{-7})$ 、 $[10^{-7}, 10^{-6})$ 、 $[10^{-6}, 10^{-5})$ 、 $[10^{-5}, 10^{-4})$ 、 $[10^{-4}, \infty) \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . 为了更定量地标注耀斑等级,人们通常在上面耀斑等级字母的后面加上峰值流量的数字部分. 例如M2.5级代表峰值流量是 $2.5 \times 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的耀斑.

在 $0.5 \sim 4.0 \text{ \AA}$  和  $1.0 \sim 8.0 \text{ \AA}$  两个波段上流量的观测精度分别可达 $\sim 10^{-9} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $\sim 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . 当流量大于 $10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,探测器有可能饱和. 受饱和、仪器运行错误和来自非太阳的信号等因素的影响,GOES软X射线流量数据中存在着一些坏点,这些坏点在有关数据文件中被标注出来,它们所占的比例通常在1.0%之内,在图1中我们用叉号“×”显示这些数据点. 有些时候卫星处于远离太阳的一侧,来自太阳的辐射会被地球遮挡从而造成一定的数据缺失<sup>[2]</sup>. 这些数据缺失的时间和卫星的轨道密切相关,在所有观测时间中所占的比例也在百分之几左右. 考虑到早期GOES卫星数据的问题比较多,在下面的分析中我们只考虑1980年以后GOES卫星在高、低两个能量通道的数据.

表 1 GOES卫星软X射线探测器的服役时间以及时间分辨率

Table 1 The service periods and time resolution of the soft X-ray detectors onboard GOES satellite

| GOES-N  | Service Period                              | Time Resolution/s |
|---------|---------------------------------------------|-------------------|
| GOES 91 | 1-Jul-1974 to 17-Oct-1975                   | 3                 |
| GOES 92 | 5-Feb-1975 to 31-Mar-1978                   | 3                 |
| GOES 1  | 17-Jan-1976 to 1-Jun-1978                   | 3                 |
| GOES 2  | 1-Aug-1977 to 30-Apr-1983                   | 3                 |
| GOES 3  | 5-Jul-1978 to 4-Jan-1980                    | 3                 |
| GOES 5  | 1 to 30-May-1983, 1-Jul-1983 to 31-Jul-1984 | 3                 |
| GOES 6  | 2 to 30-Jun-1983, 1-Aug-1984 to 18-Aug-1994 | 3                 |
| GOES 7  | 1-Jan-1994 to 3-Aug-1996                    | 3                 |
| GOES 8  | 21-Mar-1996 to 18-Jun-2003                  | 3                 |
| GOES 9  | 20-Mar-1996 to 24-Jul-1998                  | 3                 |
| GOES 10 | 10-Jul-1998 to 1-Dec-2009                   | 3                 |
| GOES 11 | 21-Jun-2006 to 11-Feb-2008                  | 3                 |
| GOES 12 | 13-Dec-2002 to 8-May-2007                   | 3                 |
| GOES 13 |                                             |                   |
| GOES 14 | 2-Dec-2009 to 4-Nov-2010                    | 2                 |
| GOES 15 | 1-Sep-2010 to Present                       | 2                 |

以前对于耀斑软X射线光变统计性质的研究主要是利用 $1.0 \sim 8.0 \text{ \AA}$ 低能量通道的数据, 耀斑起始和终止时刻的认证由于受背景辐射和不同耀斑在时间上的叠加等影响而存在一定的不确定性<sup>[2,4,15]</sup>. 考虑到流量高时太阳对日地环境的影响更显著, 我们下面介绍一种可以在给定峰值流量区间识别耀斑的程序. 这样的程序可以用来更有效地研究大耀斑的统计性质以及辐射流量在峰值附近的变化特征. (1) 首先我们使用SSWIDL包中的GOES软件对数据中的坏点进行去除, 并移除有数据缺失的时间段. (2) 对于给定的流量区间 $[F_L, F_H]$ , 我们确定观测流量处在这一区间的所有数据点. (3) 考虑到坏数据点的去除和数据本身存在的统计涨落, 我们认为时间间隔小于30 s的两个相邻有效数据点是连续的; (4) 为了保证耀斑信号的显著性, 我们只考虑持续时间大于30 s的时间片断; (5) 最后我们确定这些时间片断的流量最大值( $t_p$ )、起始( $t_s$ )与截止( $t_e$ )时刻的流量分别为  $F_p$ 、 $F_s$ 和 $F_e$ . 对于持续时间大于30 s的时间片断, 并且峰值流量处在 $[F_L, F_H]$ 的耀斑, 对应的 $F_p$ 、 $F_s$ 、 $F_e$ 满足如下关系:

$$\frac{F_s - F_L}{F_L} \leq 10\%, \quad (1)$$

$$\frac{F_e - F_L}{F_L} \leq 10\%, \quad (2)$$

$$\frac{F_p - F_L}{F_L} \geq 10\%, \quad (3)$$

这里10%对应于数据的统计涨落. (1)式要求耀斑起始时刻的流量不能超过峰值流量区间下限的10%, 它有效地排除了峰值流量大于给定峰值流量区间上限的耀斑的衰减相对应的有效时间片断. 类似地, (2)式排除了峰值流量大于给定峰值流量区间上限的耀斑的上升相对应的有效时间片断. (3)式则要求耀斑流量具有较显著的增加.

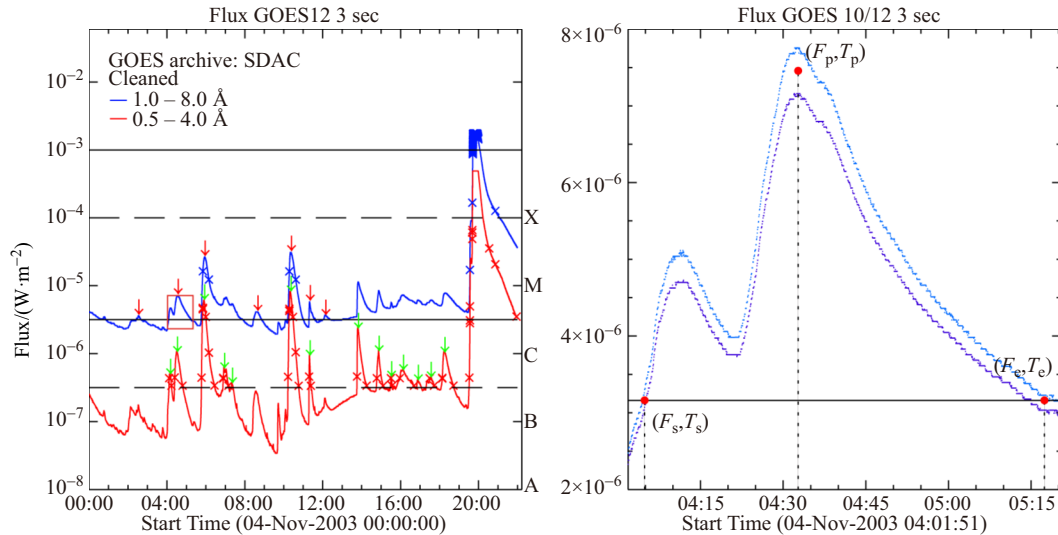


图1 耀斑识别的一个例子. 左图中“×”代表坏点, 水平的实线和虚线分别对应于1.0 ~ 8.0 Å和0.5 ~ 4.0 Å两个通道峰值流量的上下限, 向下的箭头标示识别出来的耀斑的峰值位置. 右图是对左图中小方框区域的局部放大, 这里较高的流量来自于GOES 10的数据, 有关的耀斑参数是从两颗卫星数据得到的对应参数的算术平均.

Fig. 1 An example of flare detection. Left: the cross signs stand for bad points. The horizontal solid and dashed lines correspond to the flux limits of the two soft X-ray channels: 1.0 – 8.0 Å and 0.5 – 4.0 Å, respectively. The downward arrows mark the times of the flux peak of our detected flares. The right panel is an enlarged view of the box in the left figure. The higher flux comes from GOES 10, and the flare parameters are the arithmetic mean of those obtained from the two satellite data.

图1给出了将这个程序应用到观测数据的一个例子. 虽然我们的方法不需要对每个耀斑确定并扣除背景流量, 但是当背景流量比较高时, 耀斑在时间上的重叠严重. 在图1中, 13:00之后低能量通道的一系列小耀斑被当成后面一个大耀斑的上升相没有被识别出来. 原则上这一缺陷可以通过调节流量区间范围在一定程度上减小对结果的影响, 但是考虑到耀斑行为的复杂性, 完全克服这一缺陷需要更复杂的耀斑识别程序. 图1右图也显示出不同GOES卫星给出的流量观测还是有一定差别. 当一个耀斑同时被多个卫星观测到时, 我们把由每个卫星数据得到的耀斑参数的算术平均值作为该耀斑的对应参数.

### 3 结果

参照Aschwanden等<sup>[2]</sup>对过去33 yr (1980—2012 年)耀斑爆发频数的分析, 图2 给出

了利用我们的耀斑识别程序得到的结果. 在这里, 仿照在低能量通道对耀斑等级的定义, 我们将高能量通道的耀斑分为a、b、c、m、x 5个等级, 它们对应的峰值流量区间分别为 $[10^{-9}, 10^{-8})$ 、 $[10^{-8}, 10^{-7})$ 、 $[10^{-7}, 10^{-6})$ 、 $[10^{-6}, 10^{-5})$ 、 $[10^{-5}, \infty)$   $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . 注意这个耀斑级别的定义和低能量通道耀斑级别的定义并不是一一对应关系. 也就是说低能量通道M级的耀斑并不一定对应高能量通道m级的耀斑. 结合我们前面对GOES数据的理解, 在峰值流量较小( $\leq 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )的时候背景噪声占主导, 峰值流量较大( $\geq 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )的时候探测器有可能饱和, 所以我们直接采用数据比较可靠的连续流量区间来进行耀斑识别.

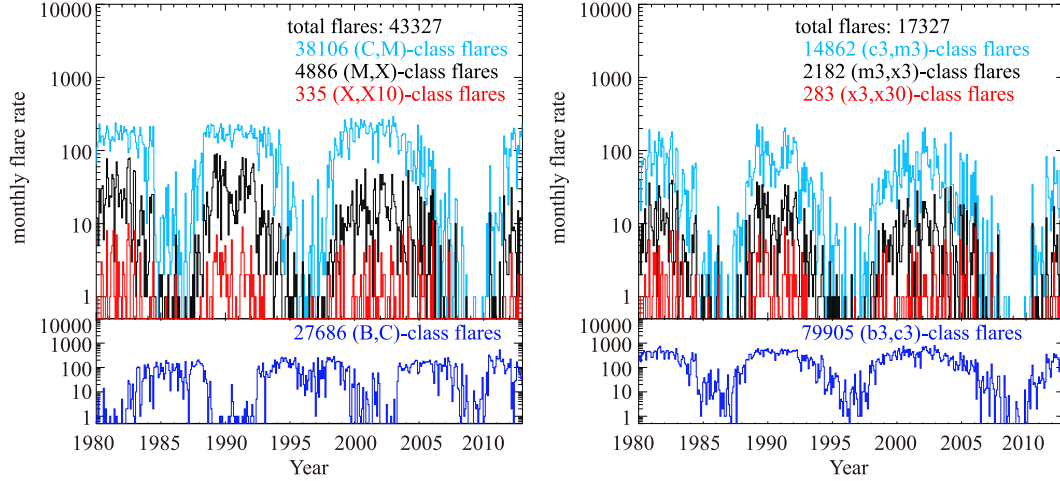


图2 过去33 yr的月均耀斑数. 不同颜色代表不同等级的耀斑, 左图对应低能量通道, 右图对应高能量通道. (B,C)级月平均耀斑数与其他等级月平均耀斑数的反相关性是由于耀斑识别程序受背景影响而具有的局限性造成的.

Fig. 2 The monthly flare numbers over the past 33 years. Different colors denote different flare classes. The left panel corresponds to the low-energy channel, and the right one corresponds to the high-energy channel. The anti-correlation of the monthly flare numbers between the (B, C) class flares and the other flares is caused by the limitation of our code during the period of high background flux.

从图2可以看到, 虽然在耀斑数量上高低通道有些差别, 但是整体上这两个通道的月爆发率表现出明显的11 yr太阳周期. 另外虽然在最高的峰值流量区间, 高低能量通道的耀斑数目相当, 但是在接下来的两个峰值流量区间低能量通道的耀斑总数则是比高能量通道的总数多1倍以上. 耀斑的频数分布多呈现幂律分布<sup>[4]</sup>, 图2可以看出高通道的幂律指数要比低通道的小. 比如在频数分布上低通道的耀斑数目从流量区间(M,X)到(X,X10)变化了约15倍, 但是高通道从流量区间(m3,x3)到(x3,x30)变化了约8倍, 结合高低通道所选择的流量区间跨越的宽度是一样的, 那么这些高低通道不同等级的耀斑数具有一定可比性. 随着峰值流量的降低, 耀斑的频数分布明显偏离幂律. 这主要是受到前面提到的耀斑识别程序的局限性的影响. 由于低能量通道受高背景的影响而遗漏小耀斑的可能性更高, (B,C)级的耀斑的月爆发数表现出和太阳活动的反相关性.

为了分析耀斑流量在峰值附近的变化特征, 我们每隔半个数量级选一个耀斑峰值区间并且定义上升时间 $t_R$ 和下降时间 $t_D$ :

$$t_R = t_p - t_s, \quad (4)$$

$$t_D = t_e - t_p. \quad (5)$$

图3给出了这两个时间的相关性. 除了不同等级耀斑数量的差异, 这两个时间的相关性好像并不依赖于耀斑的峰值流量的绝对大小.

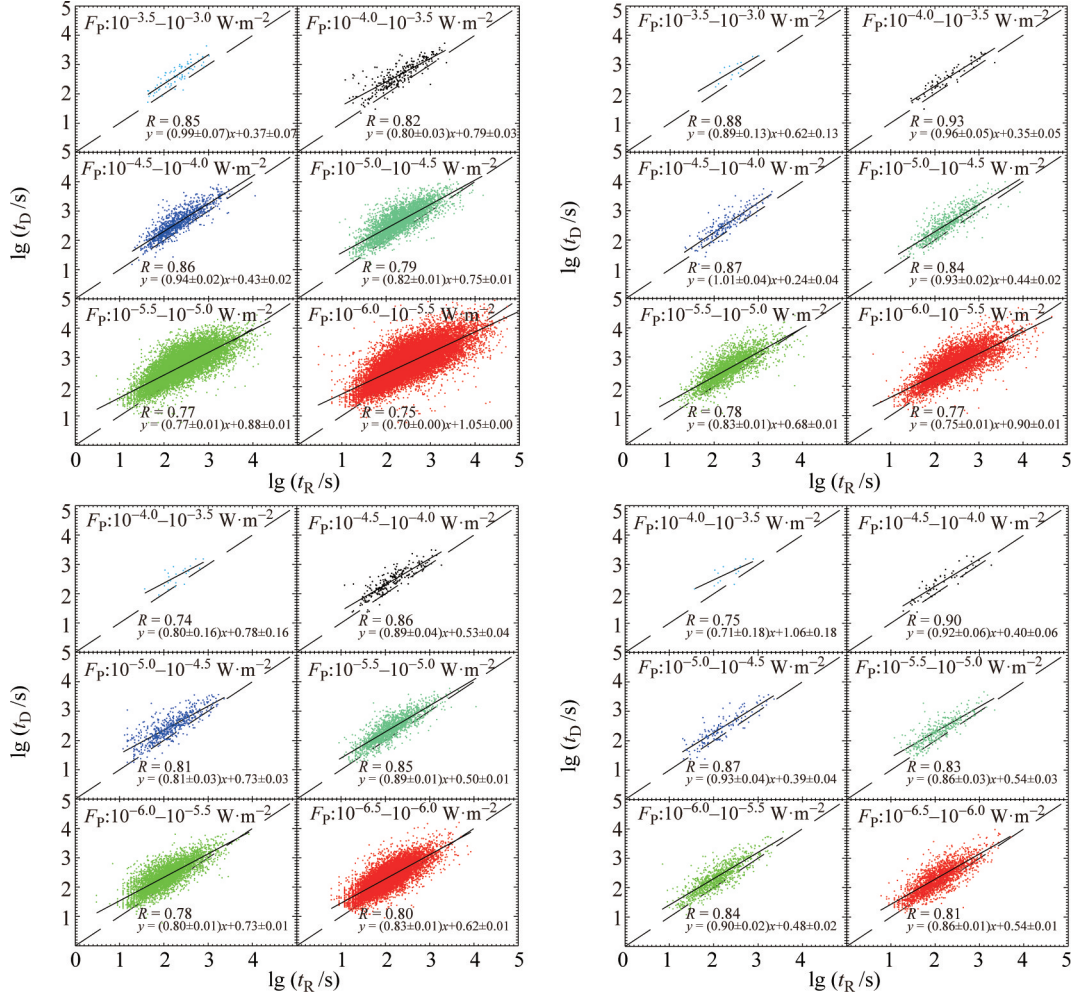


图 3 不同等级耀斑在峰值附近的上升和下降时间的相关性. 第1排左图为33 yr期间(1980—2012年)低能量通道的情形, 右图为10 yr期间(2003—2012年)低能量通道的情形; 第2排左图为33 yr期间高能量通道的情形, 右图为10 yr期间高能量通道的情形.

Fig. 3 The correlation between the rise and decay times near the peak for different class flares. The left panel in the first column shows the results of the low-energy channel in a 33-year period (1980—2012), the right one shows the results of the low-energy channel in a 10 year period (2003—2012); the second column shows the corresponding results in the high-energy channel.

在这些图中, 我们还给出了对这一相关性线性拟合的结果. 有关参数的误差代表相应的统计误差. 图3右图中给出了2003年到2012年的10 yr观测有关分析的结果, 和左图比较可以看出有关拟合参数随样本的变化比较大. 这也表明这些参数的系统误差比相应的统计误差要大得多. 考虑到这些系统误差, 我们认为这两个时间的相关性与耀斑的峰

值流量的绝对大小无关. 另外我们注意到峰值流量小的耀斑拟合斜率较小, 这可能是受到耀斑识别程序的局限性的影响.

图4给出了这些耀斑的峰值流量和相应耀斑持续时间 $t_{\text{DURATION}}$ , 以及上升与下降时间之间的相关性.

$$t_{\text{DURATION}} = t_{\text{R}} + t_{\text{D}}. \quad (6)$$

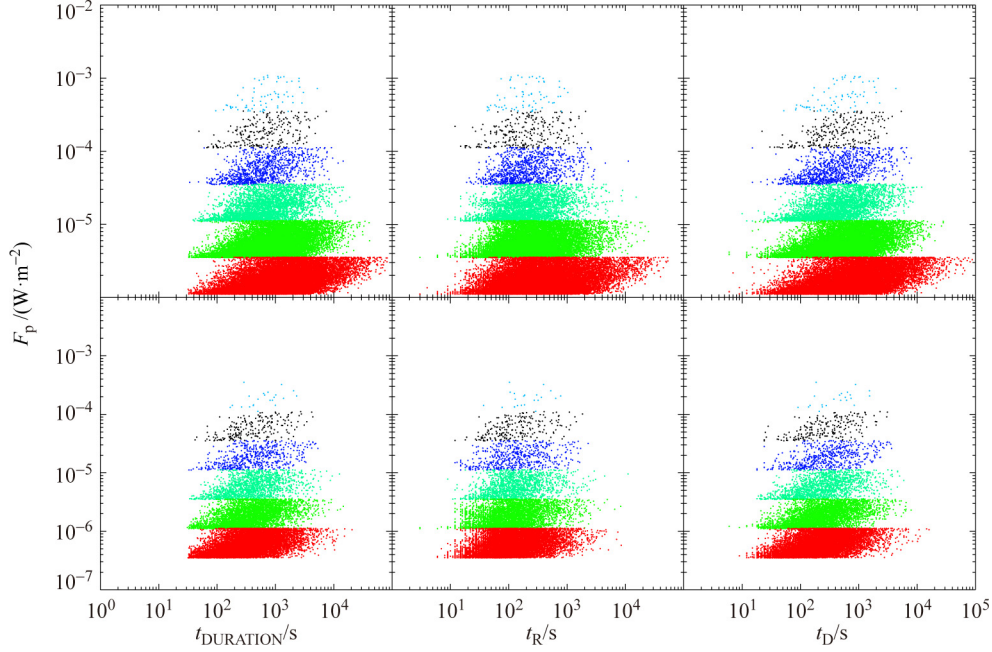


图4 不同耀斑峰值流量区间得到的耀斑的峰值流量和耀斑持续时间、上升与下降时间之间的相关性. 第1排为低能量通道的情形, 第2排为高能量通道的情形.

Fig. 4 The correlation of the peak flux of different class flares and the corresponding duration, rise and decay times. The first row shows the results of the low-energy channel, the second row shows the results of the high-energy channel, respectively.

统计上讲, 这些时间都会随峰值流量的增加而增加, 但是这些时间本身的弥散比较大, 并且弥散程度好像并不依赖于峰值流量变化幅度和绝对大小. 为了更定量地分析这些时间的统计性质, 图5给出了不同等级耀斑上升和下降时间以及它们之比的对数的平均值及方差, 误差棒为相应参数的统计方差. 耀斑的很多物理特征参量的频数分布为比较宽的幂律或者双幂律分布, 所以直接得到的有关参量的均值并不能代表系统的特征, 在对数空间求得平均值能更合理地给出耀斑特征参量的变化趋势. 图5中下降时间和上升时间之比的对数并不依赖于耀斑的级别(第1列第3排), 这个比值的对数的平均值分布在0.30附近. 这说明平均而言下降时间大约是上升时间的两倍. 对于高能量通道, 上升和下降时间的对数的平均值分别在2.1和2.4附近取值(第1列第1、2排), 相应的方差在0.37和0.44附近取值(第2列第1、2排), 这两个时间之比的对数的方差在0.26附近取值(第2列第3排), 并且这些量都不依赖于耀斑的等级. 低能量通道的上升和下降时间比高能量通道的对应时间要长, 并且这些时间的对数的平均值和方差似乎随耀斑峰值流量

的增加而减小. 特别是下降和上升时间之比的对数的方差显示出对耀斑等级的明显依赖. 考虑到这一趋势在小耀斑时表现突出, 我们认为这个趋势是由于我们的耀斑识别程序的局限性造成的, 它并不反映耀斑的内禀属性. 当耀斑峰值流量较低时, 由于受背景流量以及耀斑在时间上的重叠的影响, 我们得到的上升和下降时间不一定对应于单个耀斑事件, 这些时间因此会有更大的弥散.

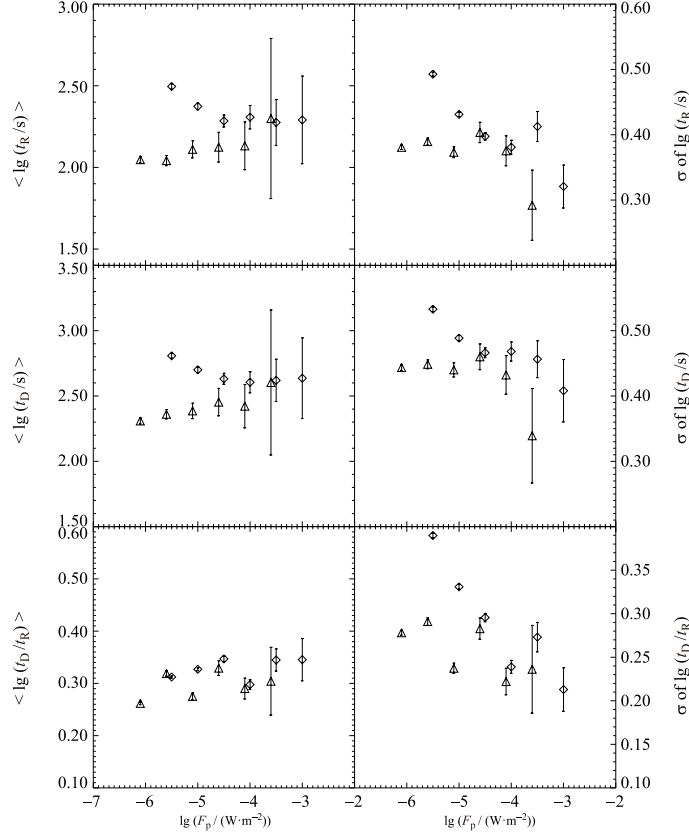


图 5 不同等级耀斑在峰值附近的上升和下降时间以及它们之比的统计性质. 三角符号为高能量通道的情形, 菱形为低能量通道的情形. 为了清楚起见, 高能量通道的数据点向左移动了 0.1 个单位.

Fig. 5 The statistical properties of rise time, decay time, and their ratio for different class flares. The triangles stand for the high-energy channel situation, and the diamonds stand for the low-energy channel situation. For the purpose of illustration, the data points for the high-energy channel have been shifted to the left by 0.1.

## 4 讨论和结论

通过发展一套在给定的峰值流量区间识别耀斑的程序, 我们分析了 GOES 两个软 X 射线能量通道 33 yr 的流量观测数据, 再现了不同等级耀斑的爆发频率都呈现 11 yr 太阳周期. 这些结果同时显示高低两个能量通道的峰值流量的频数分布并不相同, 和人们经常研究的低能量通道相比, 高能量通道峰值流量的分布范围更大. 通过进一步分析耀斑在峰值附近上升和下降时间的统计特征, 我们发现上升和下降时间有很好的相关性,

并且平均而言下降时间比上升时间长一倍. 虽然在流量峰值附近随着流量变化幅度的增加, 上升和下降时间都会增加, 但是这个增加量和对于给定的流量变化幅度的这些时间的内禀弥散相比要小得多. 总体而言高能量通道的上升和下降时间比相应的低能量通道时间短一些, 但是这些时间并不随着耀斑峰值流量绝对大小的改变而改变. 也就是说, 在峰值流量附近大耀斑流量的变化特征与小耀斑相似. 这在一定程度上支持自组织临界模型对耀斑统计性质的解释, 但是考虑到高低两个能量通道耀斑峰值流量频数分布的差异, 我们需要考虑相关的软X射线辐射机制和相关物理过程才能对这些结果给出更定量的解释. 我们也没有发现存在脉冲和缓变两类耀斑的证据.

### 参 考 文 献

- [1] Li Y P, Gan W Q, Feng L, et al. RAA, 2013, 13: 1482
- [2] Aschwanden M J, Freeland S L. ApJ, 2012, 754: 112
- [3] Veronig A M, Temmer M, Hanslmeier A. SoPh, 2004, 219: 125
- [4] Veronig A, Temmer M, Hanslmeier A, et al. A&A, 2002, 382: 1070
- [5] Temmer M, Veronig A, Hanslmeier A, et al. A&A, 2001, 375: 1049
- [6] Veronig A, Vršnak B, Dennis B R, et al. A&A, 2002, 392: 699
- [7] Aschwanden M J. SoPh, 2011, 274: 119
- [8] Wheatland M S, Litvinenko Y E. SoPh, 2002, 211: 255
- [9] Lu E T, Hamilton R J. ApJ, 1991, 380: L89
- [10] Aschwanden M J. SoPh, 2011, 274: 99
- [11] Aschwanden M J. A&A, 2012, 539: A2
- [12] 韩斐然, 刘四明. 天文学报, 2012, 53: 482
- [13] Han F R, Liu S M. ChA&A, 2013, 37: 277
- [14] Garcia H A. SoPh, 1994, 154: 275
- [15] Ryan D F, Milligan R O, Gallagher P T, et al. ApJS, 2012, 202: 11

## Statistical Properties of Flare Soft X-ray Fluxes

ZHANG Ping<sup>1,2,3</sup>    LIU Si-ming<sup>1,2</sup>

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**ABSTRACT** In order to quantitatively study the statistical properties of the soft X-ray emission of solar flares, an algorithm is developed to automatically detect flares in the light curve for a given flux range, and to analyze the GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) data from 1980 to 2013 in two soft X-ray bands. This study indicates that the statistical characteristics near the peak flux of big flares have nothing to do with the absolute peak flux: on average, the rise time of flares is about half of the decay time. Compared with the low-energy channel, the corresponding time in the high-energy channel is shorter. However, these times increase with the increase of the variation of the peak flux for a flare.

**Key words** solar: flares, X-rays, methods: statistical