0254-6124/2016/36(1)-012–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LU Yangping, ZHAO Haofeng, LE Guiming, YIN Zhiqiang, CHEN Minhao, LI Zhongyi. Analysis of the properties of solar active regions and the solar flares during 1996—2008 (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(1): 12-17. DOI:10.11728/cjss2016.01.012

1996−2008 年期间活动区与耀斑活动的特征分析 *

陆阳平[1,2] 赵浩峰[1] 乐贵明[2] 尹志强[3] 陈旻昊[1,2] 李仲怡[1,2]

1(南京信息工程大学数学与统计学院 南京 210093)

2(中国气象局国家空间天气监测预警中心 空间天气重点实验室 北京 100081)

3(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要 在 1996—2008 年期间, 可见日面共出现 3067 个活动区, 其中活动区面积 S 满足 $10\,\mu\mathrm{h} \leqslant S \leqslant 90\,\mu\mathrm{h}$ (μh 为太阳半球面积的百万分之一) 的活动区数量占活动区总数的 58.52%, $100\,\mu\mathrm{h} \leqslant S \leqslant 490\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量占活动区总数的 31.43%, 而 $S \geqslant 500\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量仅约占活动区总数的 6%, $S \geqslant 1000\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量仅约占活动区总数的 1%, 面积为 0 的活动区约占活动区总数的 4%. 1996—2008 年期间, 除面积低于 $50\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区外, 不同面积活动区的数量占该年活动区总数比例的最大值通常都在太阳活动峰年之后, 即相对太阳黑子数平滑月均值都有一定的延迟. 在 1997—2008 年期间, 至少能够产生一个 A 级耀斑的活动区数量为 1408 个, 而在此期间, 共产生了 7706 个 C 级耀斑、1141 个 M 级耀斑和 110 个 X 级耀斑. C 级耀斑在 1∼8 Å波段流量的积分值为 22.711 $\mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, M 级耀斑在 1∼8 Å波段流量的积分值为 29.443 $\mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, X 级耀斑在 1∼8 Å波段流量的积分值为 36.178 $\mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$. 第 23 太阳活动周期间, 南半球的耀斑活动比北半球强.

关键词 太阳黑子, 太阳耀斑, 日面活动区

中图分类号 P 353

Analysis of the Properties of Solar Active Regions and the Solar Flares during 1996−2008

LU Yangping[1,2] ZHAO Haofeng[1] LE Guiming[2]

YIN Zhiqiang[3] CHEN Minhao[1,2] LI Zhongyi[1,2]

1(*Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*Key laboratory of Space Weather, National Center Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

3(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

Abstract The total number of solar Active Regions (AR) N_t that occurred during 1996—2008 is 3067. And 58.52% of the N_t are the AR with the area satisfying the condition $10\,\mu\mathrm{h} \leqslant S \leqslant 90\,\mu\mathrm{h}$,

* 国家重大科学研究计划项目 (2012CB957801), 国家自然科学基金项目 (41074132, 41274193, 41474166) 和质检总局行业专项 (200710123) 共同资助

2015-06-17 收到原稿, 2015-09-12 收到修定稿

E-mail: lyp199004@126.com

31.43% of the $N_{\rm t}$ are the AR with the area satisfying the condition $100\,\mu{\rm h} \leqslant S \leqslant 490\,\mu{\rm h}$. The AR with area $S \geqslant 500\,\mu{\rm h}$ only accounted for about 6% and the ARs with area $S \geqslant 1000\,\mu{\rm h}$ only accounted for about 1% of the total AR. The AR with area being 0 accounted for 4.01%. For each year during 1996—2008, the ratio of AR with different area S to the total number of AR usually reached its maximum at the time several years after solar maximum except the AR with area $S \leqslant 50\,\mu{\rm h}$. The number that can produce at least one solar X-ray flare during 1997—2008 is 1408. The total number of C-class flares is 7706, while the total number of M-class flare is 1141 and the total number of X-class flare is 110 during 1997—2008. The sum of time integral of X-ray flux in 1∼8Å produced by all C-class, M-class and X-class flares are 22.711, 29.443 and 36.178 J·m^{-2}. The Soft X-Ray (SXR) flare activities in the southern hemisphere are stronger that in the northern hemisphere during Solar Cycle 23.

Key words Sunspot, Solar flare, Solar active regions

0 引言

太阳黑子是一种缓变型的太阳活动, 而太阳耀斑则为爆发性的太阳活动. 由邻近黑子组成的活动区即黑子群, 其是爆发性太阳活动的主要源区. 1996 年为第 22 太阳活动周低年, 也是第 23 太阳活动周起始年, 2000 年为第 23 太阳活动周黑子数平滑月均值最大年, 而 2008 年为第 23 太阳活动周的最后一年. 在太阳活动周的起始阶段, 活动区通常比较少, 而且通常出现在纬度比较高的区域. Li 等 [1] 对日面高纬黑子与太阳活动的关系进行研究, 提出可用第一次出现的高纬黑子进行整个太阳活动周的预报. 由于第 23 周第一个高纬黑子出现在南半球, 据此预测第 23 太阳活动周南半球的太阳活动更活跃 [2−3], 随着第 23 活动周的结束, 活动区数据证明了第 23 太阳活动周南半球活动区的总面积超过北半球, 研究结果得到了验证. 第 23 太阳活动周产生了大量的软 X 射线耀斑, 针对这一情况开展了大量研究 [4−6]. 相对于太阳黑子数平滑月均值而言, 非常强的太阳活动和空间天气事件通常会有一个时间上的延迟, 即这些事件中的多数通常出现在太阳活动周的下降段 [7−11].

本文重点研究了 1996—2008 年期间太阳活动区的数量及不同面积活动区占活动区总数的比例, 相对于太阳黑子数平滑月均值而言不同面积活动区出现延迟现象的可能性, 以及针对 1996—2008 年期间南半球活动区总面积超过北半球的现象, 南北半球软 X 射线耀斑活动所表现出来的不对称性特征.

1 数据分析

1.1 数据来源

太阳活动区出现的时间、日面经纬度、面积、卡林顿经度等数据 * 以及每一个活动区产生的 X 射线耀斑的强度和耀斑在软 X 射线波段的积分流量信息 ** 均取自美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 相关网站.

1.2 活动区面积的统计分析

任何一个活动区从其在可见日面被观测到开始再到其从可见日面消失的过程中, 活动区的面积通常会发生变化. 对于每一个活动区, 本文仅记录该活动区的最大面积 S. 1996—2008 年期间活动区总数为 3067 个, 表 1 列出了这些活动区的面积范围及不同面积大小的活动区占活动区总数的比例, 同时统计出了不同面积大小的活动区数量.

表 1 给出的是不同面积活动区的数量及其占活动区总数的比例. 从表 1 可以看出, 在一个太阳活动周期间内, 绝大多数的活动区都是面积比较小的活动区. 为更好地显示活动区数量随面积的变化, 将表 1 数据进行适当简化, 简化结果列于表 2. 从表 2 可以看出, 在 1996—2008 年期间, $10\,\mu{\rm h} \leqslant S \leqslant 90\mu{\rm h}$ 的活动区数量占活动区总数的 58.52%, 而 $100\,\mu{\rm h} \leqslant S \leqslant 490\,\mu{\rm h}$ 的活动区数量占活动区总数的 31.43%. $S \geqslant$

*http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html

**ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes

表 1 1996—2008 年不同面积活动区数量及所占比例

Table 1 Number and ratio of active regions with different area during 1996—2008

序号	活动区面积/μh	数量	所占比例/(%)
1	0	123	4.01
2	10	416	13.56
3	20	340	11.09
4	30	247	8.05
5	40	197	6.42
6	50	156	5.09
7	60	136	4.43
8	70	112	3.65
9	80	90	2.93
10	90	101	3.29
11	[100, 200)	528	17.25
12	[200, 290)	294	9.59
13	[300, 390)	108	3.52
14	[400, 500)	70	2.28
15	[500, 1000)	151	4.92
16	$\geqslant$ 1000	34	1.11

表 2 1996—2008 年不同面积范围活动区比例

Table 2 Number and ratio of active regions with different area range during 1996—2008

序号	活动区面积/μh	数量	比例/(%)
1	0	123	4.01
2	10∼50	1356	44.21
3	60∼90	439	14.31
4	100∼490	964	31.43
5	500∼990	151	4.92
6	$\geqslant$ 1000	34	1.11

500 μh 的活动区数量仅约占活动区总数的 6%, $S \geqslant 1000\,\mu$h 的活动区数量仅约占活动区总数的 1%. 可以说明绝大多数 (约 94%) 活动区的面积低于 500 μh. 在 1996—2008 年期间, 面积为 0 的活动区数量占活动区总数的比例达到 4.01%.

1.3 不同面积活动区数量逐年分布情况

为了分析每一年中不同面积活动区的数量以及不同面积活动区占该年活动区总数的比例, 表 3 给出了 1996—2008 年期间不同面积活动区数量的逐年分布情况. 从表 3 可以看出, 由于 2000 年为第 23 太阳活动周的最大年, 不同面积活动区的最大数量均出现在太阳活动最大年附近 (1999—2002 年). 面积超过 1000 μh 的活动区总数为 34 个, 出现在 1999—2003 年期间的数量为 27 个, 说明非常大的活动区主要集中出现在太阳活动峰年附近. 表 3 给出的是 1996—2008 年不同面积活动区的数量分布; 表 4 给出的是每一年不同面积活动区数量占当年活动区总数的比例, 每列给出了一个不同面积范围的活动区数量所占比例随太阳活动周的逐年变化情况. 从表 4 可以看出, 除面积小于 50 μh 的活动区外, 其他面积的活动区占活动区总数的最大比例均出现在太阳活动周的下降段. 从表 4 还可以看出, $50\,\mu\text{h} \leqslant S < 100\,\mu$h 的活动区在 2006 年的数量占该年活动区总数的比例为 28.41%, 是 1996—2008 年各年所占比例最大的一年. 对于 $S \geqslant 1000\,\mu$h 活动区, 其所占比例最大年份为 2005 年, 相对太阳黑子数平滑月均值的最大值, 时间上延迟了多年. 其他面积的活动区也有类似的延迟现象, 太阳耀斑和 CME 的数量也有类似延迟现象.

1.4 南北半球太阳软 X 射线耀斑流量总和的不对称性

第 23 太阳活动周第一个高纬活动区出现在南半球的 7964 (37°S, 57°E) 活动区, 依此 Li 等 [1] 预测在第 23 太阳活动周南半球的黑子活动要强于北半球. 第 23 活动周实际的太阳活动区观测数据也证实了这一结论.

在描述太阳耀斑的剧烈程度时, 可以采用多种方式, 例如 1∼8 Å 波段流量的峰值可以表达耀斑强度, 耀斑指数 (FI_{SXR}) 也可以用来描述耀斑的剧烈程度. 一天当中发生多个耀斑事件时, 这些耀斑事件的耀斑指数 [12]

$$FI_{\text{SXR}} = 0.1 \times \sum_i m_{\text{B}} + 1.0 \times \sum_j m_{\text{C}} + 10.0 \times \sum_k m_{\text{M}} + 100.0 \times \sum_l m_{\text{X}}. \quad (1)$$

其中, i, j, k, l 为 B, C, M, X 级耀斑的数量.

从式 (1) 可以看出, 在计算不同强度的耀斑对耀斑指数的贡献时, 设置的权重不同. 对于 B, C, M, X

表 3 1996—2008 年不同面积 (单位 μh) 活动区的数量

Table 3 Number of different active area (Unit μh) during 1996—2008

年份	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	合计
1996	54	5	7	3	0	2	0	0	0	1	0	0	72
1997	70	27	14	5	0	1	1	1	1	0	1	1	122
1998	158	38	39	21	11	6	8	4	3	1	0	1	290
1999	197	57	61	29	17	11	4	8	1	2	1	4	392
2000	197	93	90	39	19	10	10	4	3	2	4	6	477
2001	187	96	84	51	18	7	9	5	6	4	1	6	474
2002	183	93	91	40	19	18	6	7	7	4	3	6	477
2003	108	68	56	21	15	5	4	4	3	3	1	5	293
2004	62	41	35	16	9	3	5	1	2	1	2	2	179
2005	34	32	30	10	7	5	1	4	0	1	0	3	127
2006	34	25	15	5	3	2	0	3	1	0	0	0	88
2007	19	12	5	4	3	0	3	0	0	0	0	0	46
2008	20	8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	30

注 S1 为 [0, 50), S2 为 [50, 100), S3 为 [100, 200), S4 为 [200, 300), S5 为 [300, 400), S6 为 [400, 500), S7 为 [500, 600), S8 为 [600, 700), S9 为 [700, 800), S10 为 [800, 900), S11 为 [900, 1000), S12 为 $\geqslant$ 1000.

表 4 1996—2008 年期间不同面积活动区数量占活动区总数的比例 (%)

Table 4 Percentage of different active area in each year during 1996—2008

年份	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
1996	75.00	6.94	9.72	4.17	0.00	2.78	0.00	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00
1997	57.38	22.13	11.48	4.10	0.00	0.82	0.82	0.82	0.82	0.00	0.82	0.82
1998	54.48	13.10	13.45	7.24	3.79	2.07	2.76	1.38	1.03	0.34	0.00	0.34
1999	50.26	14.54	15.56	7.40	4.34	2.81	1.02	2.04	0.26	0.51	0.26	1.02
2000	41.30	19.50	18.87	8.18	3.98	2.10	2.10	0.84	0.63	0.42	0.84	1.26
2001	39.45	20.25	17.72	10.76	3.80	1.48	1.90	1.05	1.27	0.84	0.21	1.27
2002	38.36	19.50	19.08	8.39	3.98	3.77	1.26	1.47	1.47	0.84	0.63	1.26
2003	36.86	23.21	19.11	7.17	5.12	1.71	1.37	1.37	1.02	1.02	0.34	1.71
2004	34.64	22.91	19.55	8.94	5.03	1.68	2.79	0.56	1.12	0.56	1.12	1.12
2005	26.77	25.20	23.62	7.87	5.51	3.94	0.79	3.15	0.00	0.79	0.00	2.36
2006	38.64	28.41	17.05	5.68	3.41	2.27	0.00	3.41	1.14	0.00	0.00	0.00
2007	41.30	26.09	10.87	8.70	6.52	0.00	6.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2008	66.67	26.67	3.33	0.00	3.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注 S1~S12 区间定义同表 3.

级耀斑, 设置的权重分别为 0.1, 1.0, 10.0 和 100.0, 即耀斑级别每提升一级, 其权重提高 10 倍. 如果两个耀斑的强度相同, 但耀斑的时间过程不同, 则两个耀斑释放的能量肯定不同, 而依据式 (1) 计算得到的两个耀斑指数却是相同的, 因此式 (1) 无法体现两个耀斑时间过程不同这一特性. 耀斑可分为持续时间很短的脉冲型耀斑和持续时间较长的缓变型耀斑. 一个耀斑的软 X 射线 (SXR) 流量积分的计算方法如下 [13]:

$$F_{\mathrm{SXR}}=\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{e}}}[f(t)-f(t_{\mathrm{s}})]\mathrm{d}t. \tag{2}$$

式中, $f(t)$ 表示太阳软 X 射线在 1~8 Å 的流量, t_{s} 和 t_{e} 分别为软 X 射线耀斑的开始与结束时间. 从式 (2) 可以看出, 耀斑爆发时的背景流量已经被扣除, 因此式 (2) 计算得到的数据为耀斑软 X 射线流量的积分值. 依据式 (2) 可以计算出每一个耀斑在 1~8 Å 波段流量的积分值. 耀斑在软 X 射线波段的积分流量可以表征耀斑释放的能量.

在 1997—2008 年期间, 可至少产生一个耀斑的活动区数量为 1408 个, 这些活动区共产生 C 级耀斑 7706 个, M 级耀斑 1141 个, X 级耀斑 110 个. C 级耀斑产生的软 X 射线波段的积分流量 F_{AR} 总和 $\sum F_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{C}}=22.711\ \mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, M 级耀斑产生的 F_{AR} 总和 $\sum F_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{M}}=29.443\ \mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, X 级耀斑产生的 F_{AR} 总和 $\sum F_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{X}}=36.178\ \mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, 即 C 级耀斑释放的能量占总能量的 25.71%, M 级耀斑释放的能量占总能量的 33.33%, X 级耀斑释放的能量占总能量的 40.96%. 显然 C 级耀斑所释放的能量最少, 而 X 级耀斑释放的能量最多.

把一个活动区产生的所有耀斑在软 X 射线波段的积分流量加起来, 可以得到一个活动区产生的所有耀斑在软 X 射线波段的积分流量之和. 把南北半球所有活动区产生的 F_{AR} 相加, 即可得到南北半球耀斑释放的能量总和. 利用南北半球活动区产生的耀斑积分流量的总和可以分析太阳活动的南北不对称性, 即从耀斑能量的角度来分析太阳活动的南北不对称性. 定义 S_{n} 和 S_{s} 分别表示南北半球活动区产生的 F_{AR} 总和, 有

$$S_{\mathrm{n}}=\sum F_{\mathrm{AR_n}}, \tag{3}$$

$$S_{\mathrm{s}}=\sum F_{\mathrm{AR_s}}. \tag{4}$$

式中, $F_{\mathrm{AR_s}}$ 和 $F_{\mathrm{AR_n}}$ 分别代表太阳南北半球活动区产生的 F_{AR}. 经过计算分析得到

$$S_{\mathrm{n}}=38\ \mathrm{J\cdot m^{-2}},$$

$$S_{\mathrm{s}}=51.4\ \mathrm{J\cdot m^{-2}}.$$

显然, 南半球耀斑释放的能量比北半球耀斑释放的能量要大得多, 这说明无论是对于缓变型的黑子活动还是爆发性的耀斑活动, 都是南半球的太阳活动比北半球强.

2 结论

综上所述, 通过对 1996—2008 年期间活动区与耀斑活动的分析可以得出如下结论.

(1) 在 1996—2008 年期间, $10\,\mu\mathrm{h}\leqslant S\leqslant 90\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量占活动区总数的 58.52%, 而 $100\,\mu\mathrm{h}\leqslant S\leqslant 490\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量占活动区总数的 31.43%. $S\geqslant 500\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量约占活动区总数的 6%, $S\geqslant 1000\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区数量约占活动区总数的 1%. 活动区面积为 0 的活动区占活动区总数的比例为 4.01%.

(2) 至少能产生一个 X 射线耀斑的活动区数量仅有 1408 个. 在 1996—2008 年期间, 共产生 C 级耀斑 7706 个, M 级耀斑 1141 个, X 级耀斑 110 个. C 级耀斑产生的 F_{AR} 总和 $\sum F_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{C}}=22.711\ \mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, M 级耀斑产生的 F_{AR} 总和 $\sum F_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{M}}=29.443\ \mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, X 级耀斑产生的 F_{AR} 总和 $\sum F_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{X}}=36.178\ \mathrm{J{\cdot}m^{-2}}$, 即 C 级耀斑释放的耀斑能量占所有耀斑总能量的 25.71%, M 级耀斑释放的能量占所有耀斑总能量的 33.33%, X 级耀斑释放的能量占所有耀斑总能量的 40.96%.

(3) 1996—2008 年期间的每一年, 除低于 $50\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区外, 其他面积的活动区数量占该年活动区总数比例的最大值通常都在太阳活动峰年之后, 即相对太阳黑子数平滑月均值都有一定的延迟.

(4) 在第 23 太阳活动周, 南半球活动区产生的耀斑比北半球耀斑释放的能量要多, 即对于爆发性的太阳活动, 南半球比北半球要强.

在 1996—2008 年期间, 面积超过 $1000\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区中, 只有 9 个活动区为超级活动区 [14], 即在 $1000\,\mu\mathrm{h}$ 以上的活动区中, 只有 26.5% 的活动区为超级活动区. 超级活动区的主要特征是能产生非常强烈的耀斑, 这说明在面积超过 $1000\,\mu\mathrm{h}$ 的活动区

中, 只有少数活动区才会产生非常强烈的耀斑, 因此活动区面积的大小不能表征活动区是否会产生非常强烈的耀斑. 一个活动区产生的所有耀斑在软 X 射线波段积分流量的总和可以表征活动区释放能量的总和 $F_{\rm AR}$, 通过分析活动区 $F_{\rm AR}$ 的大小, 可以判断分析不同活动区释放的耀斑能量, 也可以分析太阳两个半球耀斑释放的能量总和. 1996 年太阳活动水平非常低, 因此 1997—2008 年期间太阳南半球的耀斑爆发活动比北半球强, 可以理解为在第 23 太阳活动周期间南半球的耀斑爆发活动比北半球强.

以上分析进一步证实了第 23 太阳活动周期间, 南半球比北半球的太阳活动要剧烈, 这不仅体现在太阳黑子数和黑子的面积总和上, 而且体现在爆发性的太阳耀斑活动上.

致谢 太阳活动区、耀斑及耀斑积分流量信息由 NOAA 提供.

参考文献

[1] LO Kejun, HONG Qinfang, GU Xiaoma, *et al.* Sunspots at high latitude and solar activity [J]. *Acta Astron. Sin.*, 1999, **40**: 435-438 (李可军, 洪琴芳, 顾啸马, 等. 日冕高纬黑子与太阳活动. 天文学报, 1999, 40: 435-438)

[2] LI K J, GAO P X, ZHAN L S, *et al.* The Long-term behavior of the north–south [J]. *Asym. Sunspot Act.*: *Solar Phys.*, 2009, **254**: 145-154

[3] LI K J, CHEN H D, ZHAN L S, *et al.* Asymmetry of solar activity in cycle 23 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A04101

[4] VERMA V K. Relationship of great soft X-ray flares with other solar activity phenomena [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2011, **334**: 83-102

[5] YANG Xingxing, LE Guiming, ZHANG Chengyi, *et al.* A statistical analysis of X1-, X2-class and above flares during solar cycles 21–23 [J]. *Acta Astron. Sin.*, 2013, **54**(4): 327-333 (杨星星, 乐贵明, 张成义, 等. 21～23 周 X1 和 X2 级以上耀斑的统计分析 [J]. 天文学报, 2013, **54**(4): 327-333)

[6] CHENG Libin, LE Guiming, LU Yangping, *et al.* The analysis of the properties of super solar proton events and the associated phenomena [J]. *Acta Astron. Sin.*, 2014, **55**(3): 203-210 (程立斌, 乐贵明, 陆阳平, 等. 超强太阳质子事件及相伴现象特征分析 [J]. 天文学报, 2014, **55**(3): 203-210)

[7] MENG Weijuan, LE Guiming, LIN Zhaoxiang, *et al.* Distribution of CMEs in different angular width and its relationship with the phase of sunspot numbers in solar cycle 23 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(3): 225-230 (孟伟娟, 乐贵明, 林兆祥, 等. 第 23 周不同角宽 CME 的分布及与太阳黑子数位相的比较 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(3): 225-230)

[8] LE G M, CAI Z, WANG H N, *et al.* Solar cycle distribution of great geomagnetic storms [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2012, **339**: 151-156

[9] LE G M, CAI Z, WANG H N, *et al.* Solar cycle distribution of major geomagnetic storms [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2013, **13**(6): 739-748

[10] LE G M, YANG X X, LIU Y H, *et al.* Statistical properties of X-class solar flares and their relationship with super active regions during solar cycles 21–23 [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2014, **350**: 443-447

[11] LE G M, YANG X X, LIU D, *et al.* Solar cycle distribution of strong SPEs and the related solar-terrestrial phenomena [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2014, **352**: 403-408

[12] JOSHI B, JOSHI A. The north-south asymmetry of soft X-ray flare index during solar cycles 21, 22 and 23 [J]. *Solar Phys.*, 2004, **219**: 343-356

[13] KUBO Y, AKIOKA M. Existence of thresholds in proton flares and application to solar energetic particle alerts [J]. *Space Weather*, 2004, **2**, S01002

[14] CHEN A Q, WANG J X, LI J W, *et al.* Statistical properties of super active regions during solar cycles 19–23 [J]. *Astron. Astrophys.*, 2011, **534**, A47