0254-6124/2021/41(6)-849–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

MIAO Juan, LI Zhitao, REN Tingling, WANG Xin. Statistical analysis on four kinds of space weather events during solar cycles 21∼24 (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 849-857. DOI:10.11728/cjss2021.06.849

第 21∼24 太阳周 4 类空间天气事件爆发特征统计分析

苗 娟[1,2] 李志涛[1,2] 任廷领[1,2] 王 昕[1,2,3]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 对第 21∼24 太阳周不同等级的太阳 X 射线耀斑事件、太阳质子事件、地磁暴事件及高能电子增强事件的爆发频次特征进行统计, 结果表明: 太阳周耀斑爆发的总数量与该太阳周的黑子数峰值呈正比, 耀斑总数、X 级耀斑事件数与峰值的相关系数分别为 0.974, 0.997; 太阳质子事件主要发生在峰年前后 1∼2 年, 约占总发生次数的 80%, 峰值通量大于 10 pfu ($1\,\mathrm{pfu}=1\,\mathrm{cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot s^{-1}}$) 的质子事件中, 84% 伴有耀斑爆发, 并且主要伴随 M 或 X 级耀斑, 少量伴随 C 级耀斑, 峰值通量大于 1000 pfu 的质子事件中, 98% 伴随 M 或 X 级耀斑, 并且以 X 级耀斑为主; 第 21, 22, 23 和 24 太阳周发生地磁暴最频繁的时间分别在 1982, 1991, 2003 年和 2015 年, 分别滞后黑子数峰值时间 3 年、2 年、2 年和 1 年; 72% 的高能电子增强事件发生在太阳周下降期, 24% 的高能电子增强事件发生在太阳周上升期.

关键词 太阳周, 太阳 X 射线耀斑, 太阳质子事件, 地磁暴, 高能电子增强事件

中图分类号 P 353

Statistical Analysis on Four Kinds of Space Weather Events during Solar Cycles 21∼24

MIAO Juan[1,2] LI Zhitao[1,2] REN Tingling[1,2] WANG Xin[1,2,3]

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

2(*Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

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

Abstract Based on the statistics of different intensity levels of solar X-ray flares, solar proton events, geomagnetic storms and relativistic electron flux enhancement of Solar Cycle 21∼24, the following conclusions can be drawn. Firstly, the total number of X-ray flares in solar cycle is directly proportional to the number of sunspot maximum, and the correlation coefficients of the total

2020-06-18 收到原稿, 2021-04-06 收到修定稿

E-mail: miaoj@nssc.ac.cn

number of flares, X-class flares and sunspot maximum are 0.974 and 0.997, respectively. Secondly, the solar proton events mainly occurred in the first two years before and after the peak year, accounting for 80% of the total number of events. 83% solar proton events with peak flux over 10 pfu ($1\,\mathrm{pfu}=1\,\mathrm{cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot s^{-1}}$) were mainly accompanied by X-class and M-class flares, but also with a small number of M-class flares. For the solar proton events with the peak flux over 1000 pfu, about 98% of them were accompanied by C-class flares. Thirdly, the most frequent time of geomagnetic storms occurred during Cycle 21, 22, 23 and 24 was in 1982, 1991, 2003 and 2015, respectively, which lagged behind the peak time of sunspot maximum by three years, two years, two years and one year, respectively. Finally, 72% of the relativistic electron flux enhancement occurred in the declining phase of solar cycle, and 24% of them occurred in the rising phase.

Key words Solar cycle, Solar X-ray flares, Solar proton events, Geomagnetic storm, Relativistic electron flux enhancement

0 引言

空间天气事件是指由于空间天气因素造成天基或地基技术系统功能下降以及航天员等人员健康受到损害的事件. 伴随着日益频繁的空间活动, 空间天气事件的影响越来越突出, 各工程任务对空间天气事件预报的需求也越来越强烈.

空间天气事件具有一定突发性, 并且持续时间短, 其产生机理目前还在开展深入研究中. 空间天气事件的长期变化规律和统计特性已开展了较多工作. Lingr 等 [1] 对 2008−2013 年 617 个宇宙线的福布什下降进行统计, 并对 3 个大事件进行了详细分析; Gopalswamy 等 [2] 对第 24 太阳周上升段的太阳爆发活动进行研究, 分析了大质子事件和地面 GLE 事件产生的影响因子; Subramanian 等 [3] 对第 23 和 24 太阳周上升期 M5 级以上的 X 射线耀斑、Ⅱ型射电暴及太阳质子事件进行了统计和比较研究; Xu 等 [4] 对 1973−2018 年极区暗条特征进行了研究; Lamy 等 [5] 对第 23 和 24 太阳周的日冕物质抛射和太阳风进行了统计分析; Lario 等 [6] 对第 23 和 24 太阳周日地 L1 点大于 80 keV 的粒子、磁场及太阳风热等离子体的压力进行了分析; Gopalswamy 等 [7] 对第 23 和 24 太阳周开始 73 个月内的磁云特征进行比较研究, 发现虽然第 24 周的平均黑子数下降了 40%, 但是磁云数量并没有下降; Le 等 [8] 对第 19~23 周的大地磁暴和超大地磁暴进行分析, 认为 73.2% 的磁暴发生在太阳周的下降段, 72.7% 的超大磁暴发生在下降段; Swalwell 等 [9] 对第 21~23 太阳周太阳 X 射线耀斑的持续时间进行了统计; Le 等 [10] 对 0°−90°W 经度范围内太阳质子事件与耀斑的相关性进行了统计; Paulikas 等 [11]、Baker 等 [12] 及 Li 等 [13] 对高能电子通量与太阳风的相关性进行了统计; Zheng 等 [14] 对 2010 年 4 月地球同步轨道高能电子异常增强事件进行了分析; Alexakis 等 [15] 对 23~24 太阳周的 ICME 及其对地影响特征进行了统计分析.

目前已有的多数统计分析主要针对的是某一类空间天气事件或者一段时间. 本文利用 1976 年以来的空间天气事件观测数据, 对第 21~24 太阳周的太阳 X 射线耀斑事件、太阳质子事件、地磁暴事件以及高能电子增强事件 4 类空间天气事件的发生频次特征进行统计和关联性分析, 将有助于进一步认识这 4 类空间天气事件的爆发特征, 为后续长期工程任务的规划和安排提供参考.

1 统计数据与事件等级

太阳耀斑是太阳大气局部区域突然释放巨大能量的现象, 这些能量会导致局部区域瞬时加热以及电子、 质子的重粒子加速. 太阳耀斑被发现和认识始自 19 世纪中期 [16,17], 1976 年起, 有研究依据 GOES 卫星探测的 1~8 Å波段的软 X 射线峰值流量对耀斑进行分类并沿用至今, 定义峰值流量大于 $10^{-4}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 的耀斑为 X 级, 峰值流量在 10^{-4}~$10^{-3}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 之间为 M 级耀斑, 以此类推定义了 C 级、B 级和 A 级耀斑 [18,19].

太阳质子事件是太阳爆发释放出大量高能带电

粒子 (主要成分为质子) 现象, 目前主要以地球同步轨道卫星观测到的大于 10 MeV 质子流强度判断. 地磁暴是地球磁场全球性的剧烈扰动现象, 其中 Kp 指数是表征扰动程度的主要指数之一, 由全球地磁台网中 13 个地磁台站的 K 指数计算得到, 每 3 h 一个值. 本文对地磁暴的统计主要依据 Kp 值.

高能电子增强事件是指地球外辐射带高能电子大量增加的现象, 通常以地球同步轨道观测的能量大于 2 MeV 电子通量进行判定. 美国空间天气预报中心 (SWPC) 规定, GOES 卫星大于 2 MeV 电子通量 5 min 数据连续 3 个点以上超过 10^3 pfu ($1\,\mathrm{pfu}=1\,\mathrm{cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot s^{-1}}$) 即发警报. 美国空军实验室 (USAF) 推荐预报和警报高能电子引发深层充电效应的判据是电子通量持续 3 天大于 3×10^8 pfu 或电子通量持续 1 天大于 1×10^9 pfu. 中国科学院空间环境预报中心 (SEPC) 以日累积通量为判断依据给出了高能电子增强事件的警报阈值等级.

本文对太阳 X 射线耀斑、太阳质子事件、地磁及高能电子增强事件 4 类空间天气事件的频次特征进行统计, 数据取自 NOAA NGDC 和 NOAA SWPC 网站. 在统计过程中, 对这 4 类事件等级划分采用 SEPC 警报原则, 对各类事件进行 3 种警报等级划分: 黄色警报事件 (三级)、橙色警报事件 (二级) 和红色警报事件 (一级), 其中红色警报事件 (一级) 影响最严重, 表 1 列出了各类事件的警报划分等级.

2　统计结果

2.1　太阳 X 射线耀斑事件统计

图 1 给出了第 21~24 太阳周黑子数年均值、耀斑黄色警报事件、橙色警报事件及红色警报事件年发生频次. 可以看出, X 射线耀斑事件整体爆发频次与太阳黑子数变化趋势一致, 太阳周高年爆发频繁, 其中 1981 年爆发接近 1000 次, 而在太阳活动低年, 通常每年仅有几次或十几次爆发, 尤其对于第 24 周, 太阳周开始的 2009 年和即将结束的 2018, 2019 年, 耀斑的爆发次数均为 0. 由表 2 给出的第 21~24 每个太阳周峰值黑子数 (SSNmax) 及不同警报等级的耀斑统计情况看到, 黄色警报级别耀斑事件占主体, 占总数的 90% 以上, 其中第 21 和 22 周爆发 2000 次以上, 第 23 周 1463 次, 第 24 周 769 次; 橙色警报级别事件约占 6%, 年发生在几次至几十次之间; 红色级别耀斑仅占总数的 0.3%, 多数年份零爆发, 在 4 个太阳周中, 仅有个别年份爆发红色警报事件 (1978, 1982, 1984, 1989, 1991, 2001, 2003 和 2005 年), 其中 1991 年爆发最多, 为 7 次, 其余各年 1~3 次. 耀斑的这种分布特征是由其产生机制决定的, 耀斑是储存在以黑子为主的活动区及之上的色球和日冕中强磁场能量的爆发性释放, 而结构复杂的活动区磁场拓扑结构复杂, 所包含的磁场自由能更多, 发生耀斑的机率更大. 在太阳活动高年, 活动区多且结构复杂, 易产生耀斑事件, 而在活动低年, 日面活动区相对简单, 且大部分时间处于无黑子日, 例如 2019 全年共有 281 天日面上无黑子. 因此, 耀斑发生频次的极大值出现在太阳黑子极值前后, 且大耀斑倾向于发生在大黑子、复杂磁场结构和高磁场梯度区域 [20].

从表 2 中各太阳周峰值黑子数与不同等级耀斑总数的关系可以看出, 二者呈正比. 图 2 给出了耀斑事件总量及橙色以上警报事件与黑子数峰值的线性拟合关系, 耀斑总数、橙色以上耀斑事件数与太阳周黑子峰值具有很好的相关性, 相关系数分别为 0.974, 0.997. 耀斑的发生与太阳活动区密切相关, 而活动区

表 1　4 类空间天气事件的警报等级划分

Table 1　Classification of alert levels for four types of space weather events

警报等级	X 射线耀斑/($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$)	太阳质子峰值通量/pfu	地磁暴	高能电子日积分/pfu
黄色警报事件	M1.0~M9.9 ($10^{-5}\leqslant F_{\mathrm{flux}}<10^{-4}$)	$10\leqslant F_{\mathrm{pro}}<100$	$Kp=5$ 或 6	$10^8\leqslant F_{\mathrm{elect}}<10^9$
橙色警报事件	X1.0~X9.9 ($10^{-4}\leqslant F_{\mathrm{flux}}<10^{-3}$)	$100\leqslant F_{\mathrm{pro}}<1000$	$Kp=7$ 或 8	$10^9\leqslant F_{\mathrm{elect}}<3\times10^9$
红色警报事件	$\geqslant$ X10 ($F_{\mathrm{flux}}\geqslant10^{-3}$)	$F_{\mathrm{pro}}\geqslant1000$	$Kp=9$	$F_{\mathrm{elect}}\geqslant3\times10^9$

注　F_{flux} 表示软 X 射线峰值流量, F_{pro} 表示质子峰值通量, F_{elect} 表示高能电子日积分通量.

表 2 第 21~24 太阳周不同强度太阳耀斑事件发生频次

Table 2 Frequency of solar flare events with different intensities of Solar Cycle 21~24

太阳周	峰值黑子数	黄色警报事件次数 (M1.0~M9.9)	橙色警报事件次数 (X1.0~X9.9)	红色警报事件次数 (≥ X10)	警报事件总数
21	232.9	2650 (94.1%)	160 (5.7%)	6 (0.2%)	2816
22	212.5	2088 (93.2%)	142 (6.3%)	10 (0.5%)	2240
23	180.3	1345 (91.9%)	112 (7.7%)	6 (0.4%)	1463
24	116.4	720 (93.6%)	49 (6.4%)	0	769

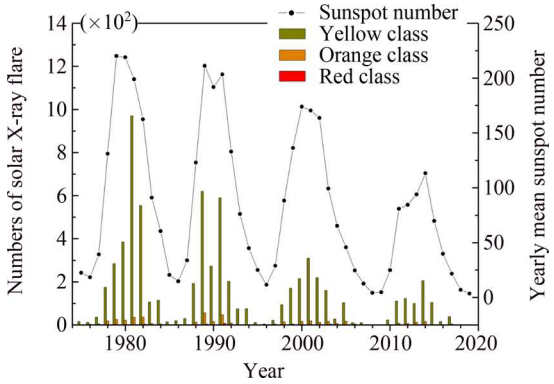

图 1 太阳黑子数年均值及不同警报等级耀斑事件的分布

Fig. 1 Yearly sunspot number and the distribution of flare events with different alert levels

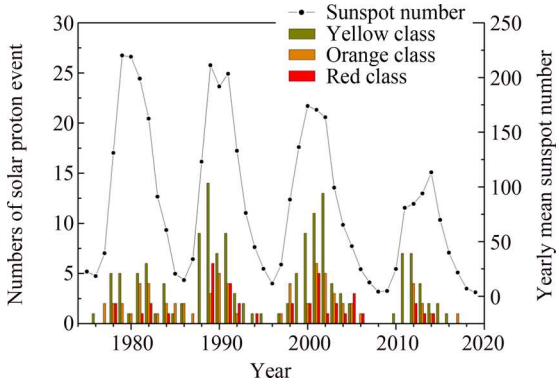

图 3 太阳黑子数年均值及不同警报等级质子事件的分布

Fig. 3 Yearly sunspot number and the distribution of solar proton events with different alert levels

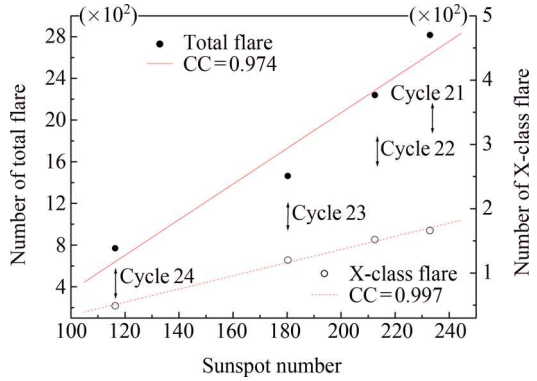

图 2 黑子数峰值与耀斑总数及 X 级耀斑的分布关系

Fig. 2 Relationship between the sunspot maximum, the total number of flares and X-class flares

相关参数有黑子数、黑子群数、黑子面积、活动区磁场等. Li 等 [21] 利用第 23 太阳周的数据统计给出耀斑产率与活动区的面积、磁类型结构都有很大关系的结论. 耀斑与黑子数峰值的相关性说明黑子数峰值一定程度上可以表征整个太阳周爆发耀斑的活跃程度, 通过对太阳黑子数峰值大小及峰值时间的预测, 能够评估未来太阳周耀斑爆发的趋势和强度.

2.2 太阳质子事件统计

根据美国 SWPC 发布的 1976 年以来太阳质子事件列表, 图 3 给出了统计的第 21~24 太阳周黑子数年均值与不同等级质子事件发生频次的关系. 可以看到, 太阳质子事件爆发次数分布随太阳黑子数呈现周期性变化, 太阳周高年发生频次较多, 但与耀斑爆发次数相比, 质子事件发生频次要少很多, 黄色警报质子事件次数最多的是 1989 年, 也仅 23 次, 橙色和红色警报事件的发生频次更少, 最多为 6 次, 分别发生在 2001 年和 1989 年. 可以认为, 太阳质子事件是一个小概率事件, 在 1976 至 2019 年间, 共发生 261 次太阳质子事件, 年平均发生频率约为 6 次. 从质子事件发生的年分布特征也可以看出, 事件主要发生在峰年前后 1~2 年, 约占总发生次数的 80%. 在太阳活动低年, 即 1996 年、2007−2009 年以及 2018−2019 年均未发生质子事件. 表 3 给出了第 21~24 太阳周峰值黑子数和不同警报等级的质子事件数量统计情况. 可以看到, 质子事件的发生次数与太阳周强度并

不完全成正比, 在第 21~24 太阳周, 无论是质子事件总数还是各等级质子事件数量, 爆发次数最多的是第 23 太阳周. 这主要是由于是否发生太阳质子事件主要取决于活动区磁场结构特性, 而黑子数只表征活动区的一个方面.

耀斑爆发过程中经常伴随高能质子 (称为质子耀斑). 为了研究二者共同发生的概率, 针对耀斑与质子事件的关系, 表 4 统计给出第 21~24 太阳周所有太阳质子事件及伴随耀斑情况. 可以看到, 261 次质子事件中, 100 次对应 X 级耀斑爆发 (占 40%), 103 次对应 M 级耀斑爆发 (占 39%), 17 次对应 C 级耀斑爆发 (占 7%). 可见, 84% 的太阳质子事件都有耀斑爆发, 并且主要伴随有 X 级和 M 级耀斑, 且二者机率相当, 少量伴有 C 级耀斑. 但是反过来, 通过耀斑的爆发可以看到, 第 21~24 太阳周共爆发 M 级和 X 级耀斑 7288 次, 仅有 203 次伴有太阳质子事件 (质子耀斑), 约占耀斑总数的 3%. 关于耀斑类型对太阳质子事件的贡献, Le 等 [10] 通过统计认为, 太阳质子事件与太阳耀斑的相关系数依赖于经度, 其中太阳耀斑积分与地球磁链接区域 (40°−70°W) 太阳质子事件强度的相关系数最大. 表 5 给出第 4 个太阳周红色警报质子事件 (质子峰值通量 $\geqslant$ 1000 pfu) 与不同级别耀斑的对应情况, 可以看出共有 40 次红色警报事件, 其中 70% 对应 X 级耀斑爆发, 28% 对应 M 级耀斑事件, 无 C 级耀斑对应. 可见, 对于通量大于 1000 pfu 的质子事件, 约 98% 伴随有大的耀斑爆发, 且主要为 X 级耀斑, 即爆发耀斑越强, 越有可能伴随强质子事件.

图 4 给出 4 个太阳周质子事件发生的日面源区位置, 根据整体的质子事件发生的源区位置分布, 可将源区分为 3 个区域, 其中 20°−90°W 发生频次最多, 其次为 50°E−20°W, 而 90°−50°E 发生次数最少, 这与太阳质子事件的东西效应特点吻合 [20], 即由于高能粒子沿磁力线扩散比垂直磁力线扩散快的特性, 西半球中部是粒子沿磁力线向地球传输的最有利位置, 由此处发出的高能粒子容易沿磁力线较快地扩散到地球.

2.3 地磁暴事件统计

图 5 给出第 21~24 太阳周黑子数年均值及不同强度地磁暴发生频次的关系. 总体而言, 发生地磁暴的次数遵循太阳周 11 年的变化周期, 太阳周低年发生频次少. 但是可以看到, 第 21, 22, 23 和 24 周发生地磁暴最频繁的时间分别在 1982, 1991, 2003 年和 2015 年, 分别滞后太阳周黑子数峰值时间 3 年、2 年、2 年和 1 年. 这主要与引发地磁暴的两种太阳现象–太阳耀斑和低纬冕洞相关. 耀斑期间磁场发展很

表 3 第 21~24 太阳周不同强度质子事件发生频次

Table 3 Frequency of solar proton events with different intensities in Solar Cycle 21~24

太阳周	峰值黑子数	黄色警报事件次数	橙色警报事件次数	红色警报事件次数	警报事件总数
21	232.9	29	20	6	55
22	212.5	48	16	13	77
23	180.3	50	26	17	93
24	116.4	24	8	4	36

表 4 第 21~24 太阳周太阳质子事件与不同级别耀斑的关系

Table 4 Relationship between the solar proton events and solar flares in Solar Cycle 21~24

太阳周	太阳质子事件数 (通量 $\geqslant$ 10 pfu)	伴有 X 级耀斑次数	伴有 M 级耀斑次数	伴有 C 级耀斑次数
21	55	29 (52.7%)	21 (38.1%)	1 (1.8%)
22	77	32 (41.6%)	28 (10.4%)	2 (2.6%)
23	93	30 (32.4%)	38 (40.9%)	10 (10.8%)
24	36	9 (25%)	16 (44.4%)	4 (11.1%)
total	261	100 (38.3%)	103 (39.5%)	17 (6.5%)

表 5 红色警报质子事件 (峰值通量 ⩾ 1000 pfu) 与不同级别耀斑的关系

Table 5 Relationship between the solar proton events with red alert levels and solar flares in Solar Cycle 21~24

太阳周	红色警报质子事件数 (通量 ⩾ 1000 pfu)	耀斑次数		
		伴有 X 级	伴有 M 级	伴有 C 级
21	6	6 (100%)	0	0
22	13	11 (84.6%)	2 (15.4%)	0
23	17	9 (52.9%)	7 (47.1%)	0
24	4	2 (50%)	2 (50%)	0
total	40	28 (70%)	11 (27.5%)	0

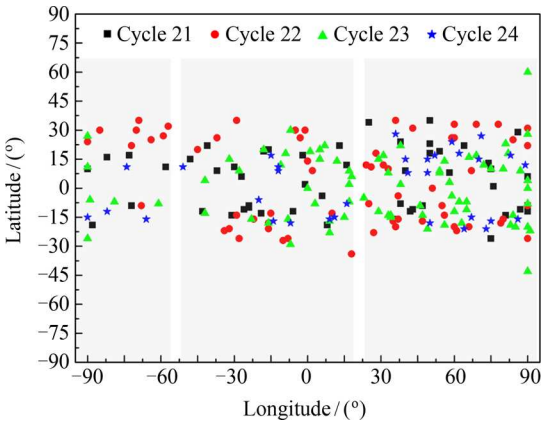

图 4 第 21~24 太阳周太阳质子事件爆发源区位置

Fig. 4 Location of the source area of solar proton events in Solar Cycle 21~24

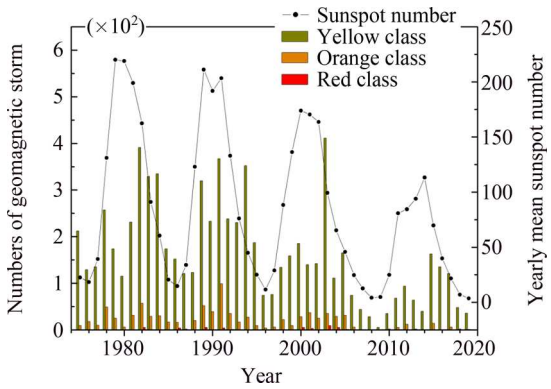

图 5 太阳黑子数年均值及不同警报等级地磁暴事件的分布

Fig. 5 Yearly sunspot number and the distribution of geomagnetic storm with different alert levels

快, 常引发急始型地磁暴, 且耀斑发生频次的极大值出现在太阳黑子峰值前后. 冕洞期间磁场发展较慢, 多引发缓始型地磁暴, 且冕洞与太阳活动负相关, 冕洞面积的极大值出现在太阳黑子峰值之后的下降相. 两种截然不同的太阳活动现象共同形成了地磁的扰动特征, 以 Kp 指数表征的地磁暴发生频次特征也说明了长寿命冕洞高速流引起的缓始型地磁暴频次高于与耀斑爆发相关的急始型地磁暴.

表 6 给出第 21~24 每个太阳周峰值黑子数和不同警报等级的地磁暴数量统计情况. 可以看到, 地磁暴发生总数与太阳周强度基本呈正比, 第 21 和第 22 周约 2600 次, 第 23 周约 2000 次, 最弱的第 24 周约 853 次. 同时可以看到, 第 23 周虽然地磁暴总数少于第 21 和第 22 周, 但是红色警报级别的地磁暴频次高于其他太阳周; 相比第 21~23 周, 第 24 周的磁暴发生总频次少很多, 并且整个太阳周没有发生过 $Kp = 9$ 的地磁暴, 这可能是由于第 24 周太阳总磁场相对减弱, 从而与地磁扰动相关的耀斑和低纬冕洞强度都减弱了, 引发地磁暴的频次降低. 图 6 给出第 21~24 太阳周太阳平均磁场变化, 与其他几个活动周相比, 第 24 周的平均向日磁场和背日磁场都在减弱.

2.4 高能电子增强事件统计

受探测数据限制, 本文仅对第 22~24 活动周的高能电子增强事件进行统计, 图 7 给出峰值黑子数和不同警报等级的高能电子增强事件数量. 3 个太阳周分布显示, 无论是发生总次数, 还是各强度事件次数, 高能电子增强事件在太阳周峰年发生频次最少, 在太阳周的下降期发生频繁. 为更详细分析高能电子增强事件的特征, 对每个太阳周不同时段的事件频次进行统计, 以峰年为界, 太阳周开始至峰年前为上升期, 峰年之后至太阳周结束为下降期.

表 7 统计给出不同太阳周发生的 3 种警报事件数量及在上升期和下降期的分布. 可以看到, 高能电

表 6　第 21~24 太阳周不同等级地磁暴发生频次

Table 6　Frequency of geomagnetic storm with different intensities in Solar Cycle 21~24

太阳周	峰值黑子数	黄色警报事件次数 ($Kp=5,6$)	橙色警报事件次数 ($Kp=7,8$)	红色警报事件次数 ($Kp=9$)	警报事件总数
21	232.9	2270	272	5	2547
22	212.5	2323	316	14	2653
23	180.3	1743	232	23	1998
24	116.4	809	44	0	853

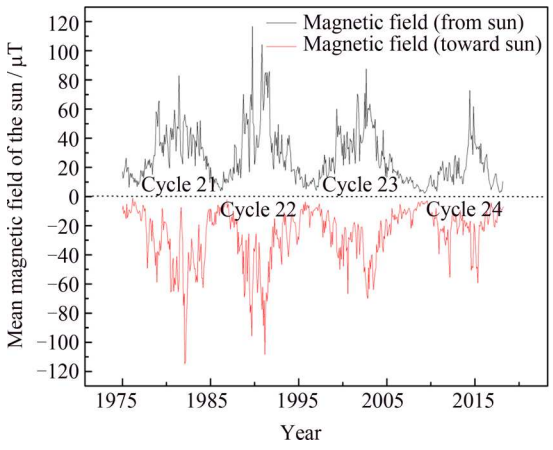

图 6　第 21~24 太阳周太阳平均磁场变化 (数据来自 WSO)

Fig. 6　Solar mean magnetic field of solar cycles 21~24 (Data from WSO)

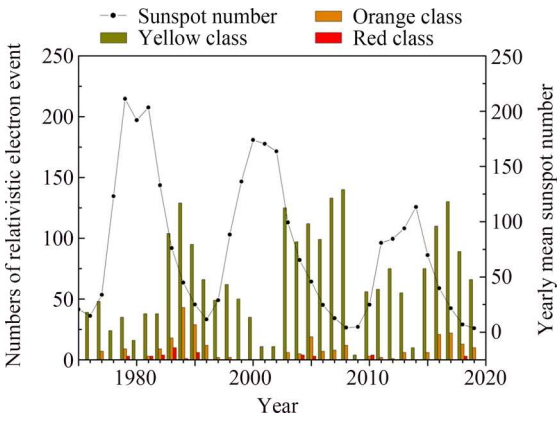

图 7　太阳黑子数年均值及不同警报等级高能电子增强事件的分布

Fig. 7　Yearly sunspot number and the distribution of relativistic electron flux enhancement with different alert levels

子增强事件主要发生在太阳周的上升期和下降期, 其中下降期爆发频次远大于上升期. 根据 GOES 卫星 1986−2019 年的统计数据, 共发生 2600 次高能电子暴事件, 其中上升期 (第 22~24 周分别取 1986−1988 年, 1996−1999 年, 2009−2013 年) 发生 625 次, 占总数的 24%; 下降期 (第 22~24 周分别取 1990−1995 年, 2001−2008 年, 2015−2019 年) 发生 1883 次, 占总数的 72%, 是上升期的 3 倍, 仅有 4% 发生在高年. 对于高能电子增强事件, 目前普遍认为其源于对磁层亚暴产生的种子电子的再加速过程 [22−24]. 在太阳周下降期, 长寿命的冕洞成为日面的主角, 产生的高速太阳风不断吹向地球, 频繁引起磁层亚暴. Baker 等 [12] 认为, 太阳风高速流是产生高能电子的重要因素. 大量统计结果也显示, 高能电子通量与太阳风速度的相关性比与其他参量的相关性更为显著 [11,13,25]. 对比地磁暴与高能电子增强事件, 在活动周的下降期, 二者均与冕洞高速流有很大关系, 然而与二者相关的主要参量不同, 地磁暴与行星际磁场南向分量更相关, 而高能电子通量则与太阳风速度更相关.

3　结论与讨论

随着社会经济发展与科学技术的进步, 人类加快了探索深空的速度, 而高技术系统的广泛使用及对其依赖程度的不断提高, 使得空间天气事件导致的灾害会对技术系统造成严重影响. 对空间天气的产生机理及影响机制目前还在深入研究中. 关于空间天气事件的长期变化规律和特性统计已开展了较多工作, 但多数只针对某一类空间天气事件或者一段时间. 本文

表 7 第 22~24 太阳周高能电子增强事件发生频次

Table 7 Frequency of relativistic electron flux enhancement with different intensities in Solar Cycle 22~24

太阳周	峰值黑子数	黄色警报事件次数	橙色警报事件次数	红色警报事件次数	警报事件总数	上升期次数	下降期次数
22	212.5	566	118	27	711	118 (16.6%)	546 (76.8%)
23	180.3	990	73	7	1070	243 (22.7%)	792 (74%)
24	116.4	728	84	7	819	264 (32.2%)	545 (66.5%)
Total	–	2284	275	41	2600	625 (24%)	1883 (72%)

利用近 50 年的事件观测资料, 对第 21~24 太阳周的太阳 X 射线耀斑事件、太阳质子事件、地磁暴事件以及高能电子增强事件共 4 类空间天气事件的发生频次特征进行全面统计和关联性分析, 进一步了解这 4 类空间天气事件的长期爆发特征. 主要结论如下.

(1) 4 类事件发生频次具有长周期的太阳活动周变化特征, 但各类事件频次特征有所不同, 同时这 4 类事件并不是完全孤立的.

(2) 对于太阳耀斑和高能质子两类太阳爆发活动, 最大爆发频次与黑子数峰值基本一致, 因为二者都源于活动区的活跃程度及复杂磁场结构, 而黑子数是活动区的一个典型表征参数. 其中, 耀斑总数、X 级耀斑事件与黑子峰值有很好的相关性, 相关系数分别到达 0.974, 0.997.

(3) 相比高频次的耀斑爆发, 太阳质子事件属于小概率事件, 并且与耀斑密切相关. 峰值通量在大于 10 pfu 的质子事件中, 84% 伴有耀斑爆发, 并且主要为 X 级和 M 级耀斑, 也伴有少量 C 级耀斑爆发; 峰值通量大于 1000 pfu 的质子事件中, 98% 伴有 M 级及以上耀斑爆发, 并且主要为 X 级耀斑. 但是反过来, 质子耀斑仅占耀斑总数的 3%, 即有耀斑却不一定有质子事件. 并且源区在 20°W−90°W 的发生频次大于其他区域, 这符合西半球中部是粒子沿磁力线向地球传输的最有利位置的理论.

(4) 对于近地两类事件, 即地磁暴和高能电子增强事件, 其最大发生频次都处于太阳周下降期, 地磁暴最频繁的时间分别在 1982, 1991, 2003 年和 2015 年, 分别滞后太阳周黑子数峰值时间 3 年、2 年、2 年和 1 年; 72% 的高能电子增强事件发生在太阳周下降期, 仅有 4% 发生在太阳黑子数峰年. 二者的最大贡献源都是长寿命冕洞高速流, 但是地磁暴与行星际磁场南向分量更相关, 而高能电子通量则与太阳风速度更相关.

第 25 太阳周已经开始, 航天任务相关部门对该太阳周的强度及各类空间天气事件爆发情况的预测提出需求. 虽然空间天气事件具有一定突发性, 目前长期预报还无法给出具体的事件爆发预测, 但通过对各类事件爆发特征的统计, 可为航天工程长期任务的规划和安排提供参考.

致谢 数据资料由 NOAA NGDC, NOAA SWPC, WSO 和国家科技基础条件平台——国家空间科学数据中心 (http://www.nssdc.ac.cn) 提供.

参考文献

[1] LINGRI D, MAVROMICHALAKI D, BELOV A, *et al.* Solar activity parameters and associated forbush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24 [J]. *Solar Phys.*, 2016, **291**: 1025-1041

[2] NAT Gopalswamy, HONG Xie, SACHIKO Akiyama, *et al.* Major solar eruptions and high-energy particle events during solar cycle 24 [J]. *Earth, Planet. Space*, 2014, **66**: 104

[3] PRASANNA S S, SHANMUGARAJU A. Study of intensive solar flares in the rise phase of solar cycle 23 and 24 and other activities [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2016, **361**: 78

[4] YAN Xu, WERNER Pötzi, HEWEI Zhang, *et al.* Collective study of polar crown filaments in the past four solar cycles [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2018, **862**: 23

[5] LAMY P, FLOYD O, QUÉMERAIS E, *et al.* Coronal mass ejections and solar wind mass fluxes over the heliosphere during solar cycles 23 and 24 (1996−2014) [J]. *J. Geophys. Res.*, 2016, **122**: 50-62

[6] LARIO D, DECKER R B, ROELOF E C, *et al.* Large energetic particle pressures in solar cycles 23 and 24 [J]. *J. Phys.*: *Conf. Ser.*, 2017, **900**(1). DOI: 10.1088/1742-

6596/900/1/012012

[7] GOPALSWAMY N, YASHIRO S, XIE H S, *et al*. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds during solar cycles 23 and 24 [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2015, **120**: 9221-9245

[8] LE Guiming, CAI Ziyu, WANG Huaning, *et al*. Solar cycle distribution of great geomagnetic storms [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2012, **339**: 151-156

[9] BILL Swalwell, SILVIA Dalla, STEPHEN Kahler, *et al*. The reported durations of GOES Soft X-Ray flares in different solar cycles [J]. *Space Weather*, 2018, **16**: 660-666

[10] LE GuiMing, WANG Hongyan, BAI Tienan. Relationship between solar proton evens and the associated solar flares [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(4): 437-443 (乐贵明, 王鸿雁, 白铁南. 太阳质子事件与太阳耀斑的关系 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(4): 437-443)

[11] PAULIKAS G A, BLAICE J B. Efects of the solar wind on magnetospheric dynamics: energetic electrons at the 500 synchronous orbit [C]//Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes. Washington: AGU, 1979: 180-202

[12] BAKER D N, LI X, TURNER N, *et al*. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A7): 14141-14148

[13] LI Xinlin, TEMERIN M, BAKER D N, *et al*. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(9): 1887-1890

[14] ZHENG Jinlei, ZHONG Qiuzhen, CHEN Liangxu, *et al*. Analysis on relativistic electron flux enhancement event at GEO in April 2010 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(4): 488-500 (郑金磊, 钟秋珍, 陈良旭, 等. 2010 年 4 月地球同步轨道相对论电子增强事件分析 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(4): 488-500)

[15] ALEXAKIS P, MAVROMICHALAKI H. Statistical analysis of interplanetary coronal mass ejections and their geoeffectiveness during the solar cycle 23 and 24 [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2019, **364**: 187

[16] CARRINGTON R C. Description of a singular appearance seen in the sun on September 1, 1859 [J]. *Month. Not. Royal Astron. Soc.*, 1859, **20**: 13-15

[17] HODGSON R. On a curious appearance seen in the sun [J]. *Month. Not. Royal Astron. Soc.*, 1859, **20**: 15-16

[18] GARCIA H A. Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements [J]. *Solar Phys.*, 1994, **154**: 275-308

[19] CLIVER E. Solar flare classification [J]. *Encyclopedia Astron. Astrophys.*, 2000. DOI: 10.1888/0333750888/2285

[20] TU chuanyi. Solar Terrestrial Space Physics [M]. Beijing: Science Press, 1998 (涂传诒. 日地空间物理 [M]. 北京: 科学出版社, 1998)

[21] LI Rong, CUI Yanmei, HE Han. Statistic analysis on solar activity parameters with solar flare and solar proton event [J]. *Sci. Technol. Eng.*, 2009, **9**(15): 4287-4291 (李蓉, 崔延美, 贺晗. 太阳活动区参量与太阳耀斑和太阳质子事件的相关性统计分析 [J]. 科学技术与工程, **9**(15): 4287-4291)

[22] BAKER D N, PULKKINEN T I, LI X, *et al*. Coronal mass ejections, magnetic clouds, and relativistic magnetospheric electron events: ISTP [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A8): 17279-17291

[23] BAKER D N. How to cope with space weather [J]. *J. Sci.*, 2002, **297**: 1486-1487

[24] LI Xinlin, BAKER D N, TEREMIN M, *et al*. Rapid enhancements of relativistic electrons deep in the magnetosphere during the May 15, 1997, magnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A3): 4467-4476

[25] XUE Bingsen, YE Zonghai. Forecast of the enhancement of relativistic electron at the geosynchronous orbit [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(4): 283-288 (薛炳森, 叶宗海. 地球同步轨道高能电子增强事件预报方法 [J]. 空间科学学报, 2004, **24**(4): 283-288)