

《太阳风暴影响与应对措施》科普丛书

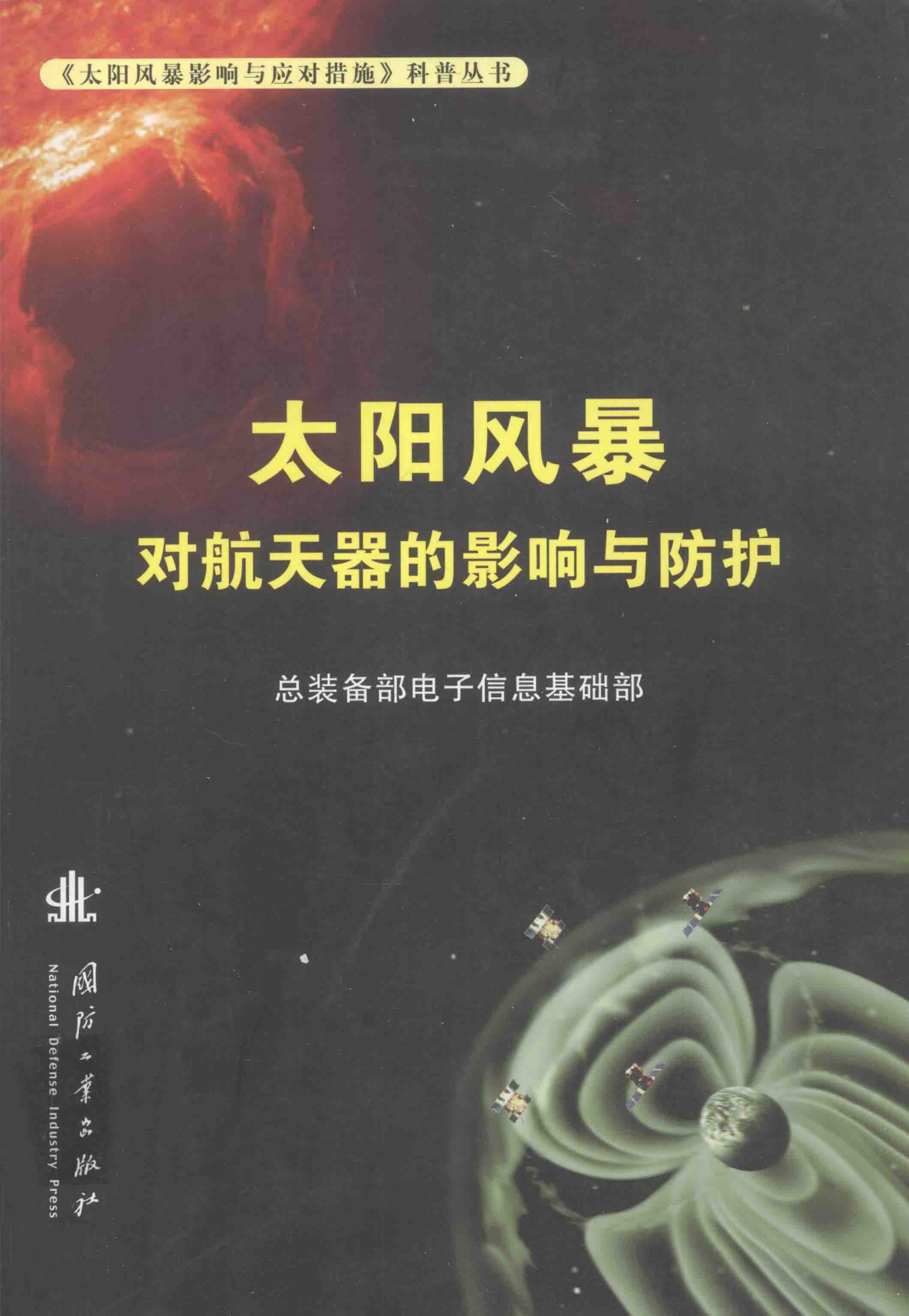
太阳风暴

对航天器的影响与防护

总装备部电子信息基础部



国防工业出版社
National Defense Industry Press



中国空间技术研究所编

太阳风暴

对航天器的影响与防护

中国空间技术研究所编

中国空间技术研究所编



《太阳风暴影响与应对措施》科普丛书

太阳风暴对航天器的 影响与防护

总装备部电子信息基础部

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

太阳风暴对航天器的影响与防护 / 总装备部电子信息基础部主编. —北京: 国防工业出版社, 2012.9
(太阳风暴影响与应对措施科普丛书)
ISBN 978-7-118-08450-4

I. ①太... II. ①总... III. ①太阳活动—影响—航天器
IV. ①P182.9②V47

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第220252号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12 字数 157 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—12000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

《太阳风暴影响与应对措施》科普丛书

顾 问 组

总 顾 问 李安东

组 长 卢锡城

成 员 李济生 姜景山 吕达仁

陶 平 都 亨 赵正予

《太阳风暴影响与应对措施》科普丛书

编委会

主任委员 辛 毅

副主任委员 王 峰

委	员	潘银喜	袁祖武	刘志伟	蔡 镭
		肖兴福	尹秋岩	梁考源	黄乔华
		董庆生	龚建村	吴 健	于登云

《太阳风暴影响与应对措施》科普丛书

总 主 编 辛 毅

《太阳风暴对航天器的影响与防护》

主 编 于登云

编写人员 蔡震波 卫新国 蒋光伟 信太林
呼延奇 张庆祥 盛丽艳 郑玉展
王志强 刘继民 陈 力 徐 昂
唐 伟 常克武 王 颖 刘 磊
郝志华 张志平 李衍存 曲少杰
向宏文 张计业

序 Preface

万物生长靠太阳。人类的生存和生活与太阳密切相关，太阳发出的光和热是地球有一个适宜环境的前提。远古以来，伴随着对太阳的深深敬畏和崇拜，人类留下了无数关于太阳的美丽神话和动人传说。实际上，太阳是一个内部活动变幻莫测的恒星，当其“心平气和”时，我们感受到它的温暖和赠与；当其“心浮气躁”时，我们也要承受它的暴虐和破坏。特别是随着信息化时代的到来，太阳活动对人类社会活动的影响力和破坏力将日益凸显。

太阳中心氢核聚变产生巨大能量，并持续不断地向四周传输。当其活动剧烈时，会发射出很强的电磁辐射，抛射出大量的高能带电粒子，喷射出高密度的等离子体等物质。上述这些物质有时会到达地球空间，并不同程度地影响和改变地球空间环境，这种现象被通俗地称为太阳风暴。太阳风暴达到一定的强度，将会影响和危害人类社会活动。例如，强烈的电磁辐射会引起地球电离层的扰动，影响通信、导航等系统效能；高能带电粒子会引起电子器件内部短路、击穿，干扰、破坏电子元器件或造成程序混乱，影响卫星、火箭等飞行器安全；大量的等离子体会引起地磁暴、电离层暴，影响地面电力系统、信息网

络和通信系统运行。

古人云：“观阴阳之开阖以命物”。在不断求索太阳奥秘和科学真理的过程中，人类逐渐认识到太阳风暴有其自身的特点和规律。只有掌握太阳风暴科学知识，预有思想准备和应对预案，才能够采取正确的防范措施，最大限度地降低其可能带来的危害。总装电子信息基础部组织编写这套《太阳风暴影响与应对措施》科普丛书，目的是普及太阳风暴基础知识，揭示其规律性和危害性，系统传授科学应对方法。丛书图文并茂、通俗易懂、案例翔实、数据准确，融知识性、趣味性于一体。丛书的出版发行，将对广大读者增长科学知识，相关领域从业人员强化防范意识、提高应对能力，起到重要的促进作用。

总装备部科技委主任
兼总装备部副部长

李 长 东

目录 Contents

◎ 第一章	为何要关注太阳风暴对航天器的影响.....	1
NO.1	什么是太阳风暴	2
NO.2	第24太阳活动周峰年即将到来	4
NO.3	太阳风暴威胁航天器的安全	8
NO.4	航天器与人类社会联系日益紧密	11
◎ 第二章	漫话航天器.....	15
NO.1	航天器的组成.....	16
	有效载荷分系统——航天器的“感官”系统.....	16
	结构与机构分系统——航天器的“骨架”和“关节”	19
	热控分系统——航天器的“体温”调节器.....	23
	姿态与轨道控制分系统——航天器的全自动“罗盘”	25
	推进分系统——航天器的“动力源”	28
	电源分系统——航天器的“心脏”	31
	数据管理分系统——航天器的“大脑”	33
	测控分系统——航天器的“信使”	35
NO.2	“各有所长”的航天器轨道	37
	地球同步轨道.....	38
	地球静止轨道	39
	低地球轨道	40
	太阳同步轨道	41
	中地球轨道	42
	大椭圆轨道	43
	行星际轨道	44
◎ 第三章	太阳风暴是如何影响航天器的.....	45
NO.1	太阳风暴影响航天器过程	46
	太阳风暴攻击航天器过程	46
	太阳风暴影响航天器的基本物理过程	49

NO.2	太阳风暴攻击航天器的7种方式.....	54
	电离总剂量效应——器件与材料性能逐渐退化	54
	位移效应——光电器件性能持续衰退.....	62
	单粒子效应——微电子器件突发异常.....	67
	表面充放电效应——星表的电磁干扰与损伤.....	75
	内带电效应——星内的电磁干扰与损伤	81
	大气阻力效应——航天器轨道衰变	85
	电离层扰动——星地电波传播受扰	89
☉	第四章 太阳风暴影响航天器实例.....	95
NO.1	太阳风暴引发航天器异常的主要表征	96
	航天器在轨常见异常现象	96
	有效载荷分系统故障	100
	姿轨控分系统故障	101
	数据管理分系统故障	104
	电源分系统故障.....	105
	测控分系统故障.....	109
NO.2	强太阳风暴事件引发航天器故障案例	112
	1989年系列磁暴和太阳质子事件.....	112
	1997年1月磁暴事件.....	114
	1998年5月高能电子暴事件.....	115
	2000年7月“巴士底”强磁暴事件.....	116
	2003年11月“万圣节”强磁暴事件.....	118
☉	第五章 航天器的太阳风暴防护.....	123
NO.1	航天器的太阳风暴防护设计	124
	电离总剂量效应的防护设计	124
	位移效应的防护设计	132
	单粒子效应的防护设计.....	134
	表面充放电效应的防护设计	139
	内带电效应的防护设计.....	148

大气阻力效应的防护设计	154
电离层扰动的防范	156
NO.2 航天器在轨运行管理.....	159
太阳风暴应对原则	159
太阳风暴应对措施	161
名词解释.....	166
英文缩略词注释.....	169
参考文献.....	172
后记.....	176

第一章 为何要关注太阳风暴 对航天器的影响

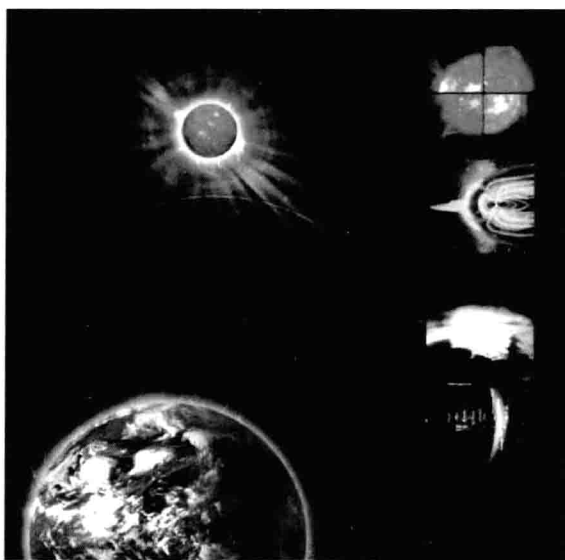
早在20世纪60年代，我国著名科学家钱学森就提出“天象”一词，“天象”是与通常的气象相类比提出来的，更确切地说，是“太空气象”。航天器运行于地球大气层以外的宇宙空间，与地球表面环境存在刮风下雨等天气现象类似，那里也存在各种空间环境状态的短时变化，称为“空间天气”，而太阳风暴则是引发空间天气变化的因素之一。随着人类社会的进步，人们越来越依赖于各种空间系统，而历史上也多次出现过强太阳风暴事件引发航天器故障甚至失效的事例。为保证航天器在轨安全可靠运行，人们对太阳风暴可能对航天器产生的影响越来越关注。



■ NO. 1 什么是太阳风暴

人类自诞生之日起，就饱受着极端天气的侵袭，如干旱、洪水、冰雹、台风等，这些灾害性天气对人类的生命和财产安全构成了极大的威胁，阻碍了社会经济的发展。随着人类科技文明的进步，尤其是20世纪中期人类进入了太空时代，在轨航天器数量不断增多，各种天基基础设施不断发展，另外一种新的灾害性空间天气——太阳风暴逐渐引起人们的关注。

太阳风暴是指太阳上的剧烈爆发活动及其在日地空间引发的一系列强烈扰动。“太阳风暴”并非科技术语，而是太阳爆发活动及其引发的近地空间环境扰动的一种形象和通俗的说法。太阳爆发活动是太阳大气中发生的持续时间短暂、规模巨大的能量释放现象，主要通过增强的电磁辐射、高能带电粒子流和等离子体云三种形式释放。太阳爆发活动喷射



▲ 太阳风暴与人类社会

（图片来自“国际与日同在计划”网站）

的物质和能量到达近地空间后，可引发地球磁层、电离层、中高层大气发生剧烈扰动。科学家形象地把太阳风暴比喻为太阳一打“喷嚏”，地球就要发“高烧”。

太阳爆发活动是太阳风暴的起源，它常常表现为两种现象。一种是人类很早就观测到的耀斑。耀斑是太阳电磁辐射突然增强的一种表现，在太阳观测图片上，耀斑常常表现为区域的突然增亮。另外一种发现较晚的日冕物

质抛射（Coronal Mass Ejection, CME）现象，它是太阳上一团带有磁场的等离子体，脱离太阳束缚，向外抛射的现象。耀斑和日冕物质抛射不一定同时出现，它们发生时还可能伴随着大量的高能带电粒子向外喷出，这些粒子主要成份是质子。增强的电磁辐射、高能带电粒子流和等离子体云是太阳爆发活动喷射的主要能量和物质。太阳风暴的另一个重要方面是太阳爆发活动引发的各类地球空间环境扰动。当太阳爆发的物质和能量朝向地球时，就可能引起地球空间环境的扰动，进而影响在轨航天器。

科学家通过对太阳活动和近地空间环境的长期监测和研究，逐渐了解到太阳风暴的一些特点和规律。太阳风暴存在周期性、突发性和地域性等突出的特点。太阳风暴的周期性主要体现在太阳活动水平的周期性变化上。太阳活动水平具有11年左右的周期性变化特征。通常在太阳活动高年，太阳爆发活动较多，太阳风暴发生频次较高，强度大。相反，在太阳活动低年，太阳爆发活动少，太阳风暴发生频次低，强度相对较弱。

虽然人类对太阳爆发性活动有了一定的观测和了解，但目前仍然没有完全掌握太阳爆发的规律。对于某次太阳爆发活动事件而言，其具体发生时间和爆发强度还无法作出准确的预报。相对于人类目前的认知水平，太阳风暴的发生具有很强的随机性和突发性。另外，太阳爆发引起的某种空间环境扰动，在地球空间的不同区域，影响程度也有所不同。例如，在太阳风暴期间，由于地球磁场的偏转和屏蔽，不同地磁纬度和不同轨道高度上的高能粒子通量存在显著的差异。对同一轨道平面上的航天器，低高度上的高能带电粒子数目远小于高轨道。对于在同一高度上的航天器，极区的高能带电粒子数目更多。

随着人类社会技术设施的不断发展，尤其是卫星在通信、导航、遥感等领域发挥了不可替代的作用，各行业部门逐渐了解到太阳风暴对航天器的危害性。另外，关于太阳风暴的报道也日益见诸报端，太阳风暴慢慢进入大众的视野。



■ NO.2 第24太阳活动周峰年即将到来

“2012年12月21日黑暗降临后，12月22日的黎明永远不会到来。历史上从来没有一个日期，能如2012年12月21日这样对人类产生巨大影响，玛雅文明预言它是世界末日，而全球的科学家、政府都无法预知这一天到底会发生什么……”这是关于全球毁灭的灾难电影《2012》的故事情节，它讲述在2012年太阳风暴引发世界末日到来时，人类如何挣扎求生。

《2012》这部影片催生了公众对太阳风暴危害的关注，而把2012年世界末日预言与即将到来的太阳活动峰年相关联，更给末日预言家们提供了有力的“佐证”。

太阳风暴与太阳活动峰年存在什么联系？即将到来的太阳活动峰年可怕吗？太空中数量不断增长的航天器能抵抗太阳活动峰年期间可能发生的强太阳风暴吗？这些问题，不只是航天器制造商、航天器用户需要面对的重要问题，也逐渐成为公众关注的焦点。

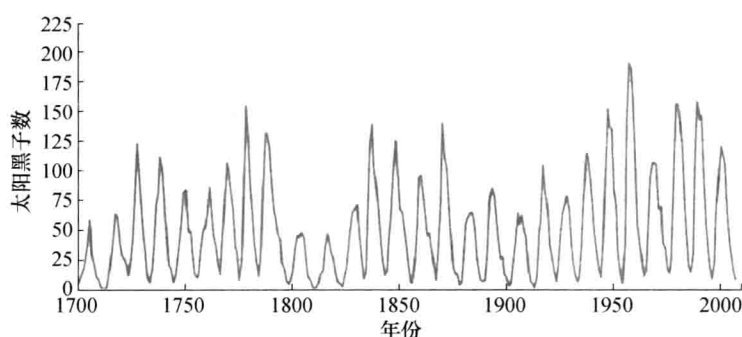
从科学上来讲，太阳风暴发生频率取决于太阳活动水平。长期的观测结果表明，太阳活动水平存在被称为“太阳活动周”的周期性变化。太阳活动周通常以太阳表面黑子数量的周期性变化为标志，其平均周期为11.2年，具体每个太阳活动周的长度为9年~13年不等。太阳活动周期从太阳活动水平较低时开始计算，一般分为上升期、峰值期和下降



▲ 有关“2012世界末日”的新闻报道

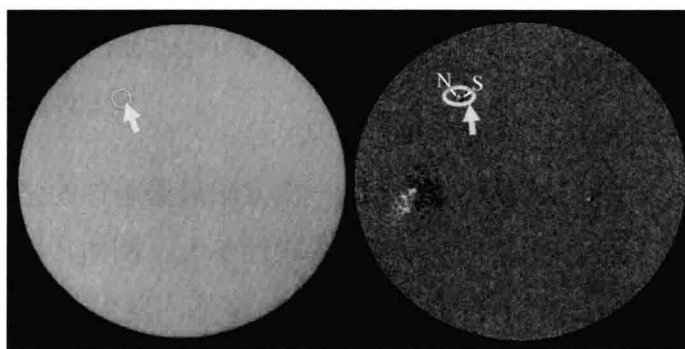
(图片来自《人民日报》)

降期。开始的4年左右为上升期，黑子不断在太阳表面产生，数量越来越多，太阳表面发生的爆发性活动加剧，黑子数达到极大值的一年称为太阳活动峰年或太阳活动极大年；在随后的7年左右时间里，太阳表面爆发性活动逐渐减弱，黑子数量也越来越少，黑子数极小的一年称为太阳活动谷年或太阳活动极小年。国际上规定，第一个太阳活动周从1755年开始，然后顺序排列。



▲ 第1~第23太阳活动周黑子数观测数据

新的太阳活动周开始时，日面上的黑子数通常出现在日面南北半球平均纬度 30° 附近；随着时间推移，黑子出现的纬度逐渐向太阳赤道移动，在太阳活动峰年附近，黑子出现的纬度



▲ 第24太阳活动周的第一个黑子照片

(图片来自<http://science.nasa.gov>)

平均为 15° ；而在太阳活动周结束时，黑子在日面上出现的平均纬度为 8° 。在每一个太阳活动周的末尾，属于新太阳活动周的黑子又开始在日面高纬地区出现。2008年1月，当第24太阳活动周的第一个黑子在日面北半球出现时，标志着太阳活动开始逐渐增强。与第23太阳活动周相比，第24太阳活动周有以下两个特点：一是上升慢，自2010年下半年才有连续的