




# 空间天气学



焦维新 编著



*Science Of  
Space Weather*

气象出版社

获北京大学光彩著作基金资助

# 空间天气学

焦维新 编著



气象出版社

## 内 容 简 介

空间天气学是应用广泛的一门新兴交叉学科,本书系统地介绍了空间天气学研究的内容和最新进展。全书分五章,第一章是概论,主要介绍了空间天气学的基本概念。第二章是太阳大气与行星际天气,重点介绍太阳耀斑、日冕物质抛射、太阳能量粒子事件和行星际激波。第三章介绍地球空间的天气系统与天气过程以及太阳活动影响气象过程的可能机制。第四章介绍空间天气对各种技术系统的效应。第五章介绍了空间天气建模和预报的基本情况和典型模式及预报方法。

本书可作为高等院校空间物理学、空间环境学和大气环境学等相关专业本科生和研究生的教材,也可作为空间科学、大气科学、天文学、环境科学、航天、通讯、军事、国防等部门研究人员和业务人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

空间天气学/焦维新编著. —北京:气象出版社,2003. 1  
ISBN 7-5029-3519-3

I. 空... II. 焦... III. 空间科学:天气学 IV. P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 105400 号

## 空间天气学

焦维新 编著

责任编辑:陶国庆 终 审:周诗健

封面设计:李忠信 责任技编:王丽梅 责任校对:王丽梅

---

出版发行:气象出版社

出版社地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

出版社电话:68407112

电子邮箱: CMP01@263.NET

出版社网址: HTTP://CMP.CMA.GOV.CN/

邮政编码: 100081

传真号码: 62176428

印 刷: 北京昌平环球印刷厂  
开 本: 787mm×960mm 1/16  
印 张: 18.5  
字 数: 372 千字  
定 价: 28.00 元

版 次: 2003 年 1 月第 1 版  
印 次: 2003 年 1 月第 1 次印刷  
印 数: 0001~4000

---

版权所有 侵权必究

# 前 言

空间天气学是研究各种空间天气现象发生、发展和变化规律,以及如何运用这些规律来进行空间天气预报的一门学科。同时,空间天气学还研究各种空间天气效应,以及避免和减轻空间天气灾害的方法和途径。

空间天气学是在太阳物理学、行星际物理学、磁层物理学、电离层物理学、高层大气物理学和气象学的基础上发展起来的一门新兴交叉学科,国外常用“science of space weather”来表示这门学科。一般认为,空间天气学是一门应用科学,但更确切地说,它是由纯粹科学和应用科学的交叉而形成的一门科学。

我是在1994年开始研究空间天气学的。使我对空间天气产生浓厚兴趣,并下决心钻研的是G. Soscoe等发表在EOS Trans(1994年8月2日)上的一篇文章。这篇文章深入浅出地论述了开展空间天气研究的意义、方针和措施;从气象业务中可借鉴的经验;空间物理学与空间天气研究的关系等,整篇文章给人以耳目一新的感觉。正是在这篇文章的启发下,我开始收集有关空间天气的资料,并于1995年分别在北京大学地球物理学系学生会举办的“天·地·人文化月”报告会、北京市地球物理学会年会和中国地球物理学会年会上,做了关于空间天气的报告。1996年,北京大学空间物理学专业率先在国内为研究生开设了“空间天气学”课程。1998年初,北京大学使用了由我编写的讲义《空间天气学》。同年5月,国家基金委地学部 and 北京大学联合举办了空间天气学讲习班,这个讲义在讲习班中发挥了重要作用。由于空间天气学发展迅速,涉及的学科领域也不断扩大,许多部门希望能系统地了解空间天气学的内容,而北京大学发行的《空间天气学》讲义早已销售一空,况且内容也需要充实和更新。因此,在2001年全国第四次空间天气学研讨会期间,南京大学方成院士鼓励我正式出版《空间天气学》。在方院士的鼓励下,我开始修订原来的讲义。同年11月,我申请北京大学光彩出版基金,

并获得批准,使正式出版《空间天气学》的愿望得以实现。

现在呈现给读者的《空间天气学》,比原讲义增加了许多新内容,反映了近年来国内外空间天气学研究的新进展。在体系上,借鉴现代天气学,围绕研究对象的空间天气系统和空间天气过程展开论述。

任何一门学科都有确定的研究对象和内容,有自己特有的研究方法。本书第一章首先介绍了空间天气的概念、典型的空间天气事件及其对人类的影响,进而论述了空间天气学研究的对象、内容、方法以及开展空间天气学研究的利益、当前空间天气学研究的特点和未来发展趋势。

与日常所说的天气不同,空间天气受太阳活动的直接影响和控制,因此,我们不仅要关心人类活动直接感知的空间天气变化,更要关心产生这些变化的源,即太阳的各种爆发性活动,这些活动伴随的粒子辐射在行星际空间传播时的特性及其衍生的天气系统。本书第二章介绍这方面内容。

地球空间是各种应用卫星运行的主要区域,也是载人飞船和空间站活动的场所。地球空间天气的变化不仅影响各类卫星的性能和可靠性,还会影响空间和地面一些技术系统的正常运行。本书第三章介绍地球空间的天气系统与天气过程。比较系统地描述了磁层环流、磁暴、磁层亚暴、动态辐射带和高能电子暴等磁层天气,突发电离层骚扰、电离层暴、传播的等离子体斑、太阳向极盖弧、散见E层、下降中间层、赤道异常、赤道扩展F和电离层不规则性等电离层与热层天气。同时介绍了太阳活动影响对流层天气过程的可能机制,这是目前在许多学科都比较关注的问题。

空间天气对各种技术系统的效应,是空间天气特有的问题,也是许多空间技术应用部门非常关心的问题。本书第四章专门论述空间天气效应,包括航天器表面和内部充电、单粒子事件、辐射效应、电离层天气对通讯、导航与定位的影响、地磁场变化对技术系统的效应、微流星和空间碎片对航天器的影响、人工局部改变空间天气及其在军事上的应用等。

空间天气学区别于空间物理学的主要方面是其预报特征。因此,本书专门用一章的篇幅介绍空间天气建模与预报。包括当前空间天气建模情况、典型

的空间天气模式、空间天气预报的主要方法,以及太阳活动预报、地磁活动预报、电离层活动预报、大气活动预报和相对论电子预报的主要方法和模式。

为了方便读者查阅,书后附有英文缩写与中文意义对照,以及主题词索引。

尽管人类对空间天气已经开展了大量的研究工作,但由于空间天气变化的复杂性和所涉及区域的广阔性,目前对许多空间天气现象的认识还是初步的。作为一门新学科,无论是学科体系,还是研究方法,都存在着诸多不完善的地方,需要不断地充实和提高。另外,作者本人对学科的认识和理解还有局限性,因此,书中的缺点甚至错误在所难免。请读者批评指正。

**焦维新**

2002年11月10日于北京大学

# 目 录

## 前言

<b>第一章 概论</b> .....	(1)
§ 1.1 空间天气及其效应 .....	(1)
1.1.1 什么是空间天气 .....	(1)
1.1.2 典型的空间天气效应 .....	(4)
1.1.3 空间天气业务 .....	(7)
§ 1.2 新兴的交叉学科——空间天气学 .....	(9)
1.2.1 空间天气学的基本概念 .....	(9)
1.2.2 空间天气学的研究对象 .....	(13)
1.2.3 空间天气学的研究方法 .....	(14)
1.2.4 空间天气学与对流层天气学比较 .....	(15)
1.2.5 空间天气学研究的利益 .....	(17)
1.2.6 空间天气学当前的状况和展望 .....	(20)
<b>第二章 太阳大气与行星际天气</b> .....	(23)
§ 2.1 概述 .....	(23)
2.1.1 太阳的结构与发电机理论 .....	(23)
2.1.2 太阳大气中的天气系统与天气过程 .....	(29)
§ 2.2 强电磁辐射型天气——耀斑 .....	(30)
2.2.1 耀斑的基本形态 .....	(30)
2.2.2 X 射线暴 .....	(32)
2.2.3 射电暴 .....	(35)
§ 2.3 强的物质喷发型天气——CME .....	(37)
2.3.1 CME 的形态特征 .....	(37)
2.3.2 CME 的结构与动力学 .....	(39)
2.3.3 CME 的能量 .....	(40)
2.3.4 CME 的直接驱动模式 .....	(42)
2.3.5 CME 存储和释放模式 .....	(43)
2.3.6 CME 与耀斑 .....	(46)

§ 2.4	太阳能量粒子事件(SEP) .....	(47)
2.4.1	SEP 一般特征和分类 .....	(47)
2.4.2	SEP 的基本性质 .....	(49)
2.4.3	CME 激波与 SEP .....	(52)
2.4.4	SEP 事件的大小 .....	(54)
2.4.5	SEP 的空间分布特性 .....	(57)
§ 2.5	太阳活动的长期变化 .....	(59)
2.5.1	太阳黑子与太阳黑子周 .....	(59)
2.5.2	太阳活动区 .....	(60)
2.5.3	太阳黑子数与地磁活动周期 .....	(61)
2.5.4	总太阳辐照度的长期变化 .....	(61)
§ 2.6	行星际天气 .....	(63)
2.6.1	行星际磁场、扇形结构与激波 .....	(63)
2.6.2	行星际空间的太阳风 .....	(65)
2.6.3	共转相互作用区 .....	(71)
2.6.4	磁云——行星际空间的 CME .....	(72)
2.6.5	行星际激波 .....	(74)
2.6.6	宇宙线 .....	(77)
<b>第三章</b>	<b>地球空间的天气系统与天气过程 .....</b>	<b>(81)</b>
§ 3.1	地球空间的天气系统概述 .....	(81)
3.1.1	地球空间的基本结构 .....	(81)
3.1.2	地球空间的主要天气系统 .....	(89)
§ 3.2	磁层天气 .....	(90)
3.2.1	磁层环流 .....	(90)
3.2.2	磁暴 .....	(94)
3.2.3	磁层亚暴 .....	(100)
3.2.4	辐射带的动态变化 .....	(102)
3.2.5	高能电子暴 .....	(103)
§ 3.3	电离层与热层天气 .....	(106)
3.3.1	电离层与热层天气系统的一般特征 .....	(106)
3.3.2	突发电离层骚扰 .....	(107)
3.3.3	电离层暴 .....	(108)
3.3.4	高纬电离层天气 .....	(112)
3.3.5	中纬天气 .....	(115)



3.3.6	低纬天气	(118)
§ 3.4	空间天气与对流层天气	(123)
3.4.1	太阳活动影响对流层天气的可能途径	(123)
3.4.2	空间天气与中性大气的电耦合	(124)
3.4.3	太阳活动影响气象过程的机制	(128)
<b>第四章</b>	<b>空间天气效应</b>	<b>(135)</b>
§ 4.1	空间天气对航天器的效应	(135)
4.1.1	与航天器设计有关的空间天气领域	(135)
4.1.2	空间天气对航天器的效应概述	(136)
§ 4.2	航天器表面充电	(137)
4.2.1	概述	(137)
4.2.2	航天器表面充电基础理论	(139)
4.2.3	LEO 航天器表面充电问题	(140)
4.2.4	LEO 航天器表面充电的统计特征	(147)
§ 4.3	航天器内部充电	(151)
4.3.1	航天器内部充电及异常分析	(151)
4.3.2	内部充电的物理机制	(157)
4.3.3	结论和措施	(161)
§ 4.4	单粒子事件	(162)
4.4.1	航天器与航空器中的单粒子事件	(162)
4.4.2	单粒子翻转发生率的计算方法	(165)
4.4.3	避免或减轻单粒子事件的措施	(171)
§ 4.5	辐射效应	(174)
4.5.1	概述	(174)
4.5.2	空间辐射对宇航员的危害	(175)
§ 4.6	电离层天气对通讯、导航和定位的效应	(176)
4.6.1	电离层中的电磁波传播概述	(176)
4.6.2	电离层对无线电系统的影响	(180)
4.6.3	电离层闪烁	(184)
§ 4.7	地磁场变化对技术系统的效应	(187)
4.7.1	地磁场的组成及变化	(187)
4.7.2	磁暴对输电系统和地下管线的影响	(188)
4.7.3	地磁场对航天器工作状态的影响	(190)

§ 4.8	高层大气变化对航天器的影响 .....	(191)
4.8.1	大气密度对低轨卫星的气动阻力效应.....	(191)
4.8.2	原子氧对航天器表面的侵蚀.....	(192)
§ 4.9	微流星与空间碎片对航天器的影响 .....	(193)
4.9.1	微流星.....	(193)
4.9.2	空间碎片.....	(194)
4.9.3	微流星及空间碎片建模.....	(196)
4.9.4	微流星及空间碎片对航天器的危害.....	(199)
§ 4.10	人工局部改变空间天气及其在军事上的应用 .....	(201)
4.10.1	空间光学背景与航天器本身的发光现象 .....	(201)
4.10.2	空间电磁干扰及其对军事的影响 .....	(208)
4.10.3	电离层人工变态及其在军事上应用 .....	(210)
<b>第五章</b>	<b>空间天气建模与预报 .....</b>	<b>(215)</b>
§ 5.1	空间天气建模 .....	(215)
5.1.1	空间天气建模概况.....	(215)
5.1.2	太阳活动建模.....	(220)
5.1.3	太阳风建模.....	(223)
5.1.4	磁层建模.....	(224)
5.1.5	电离层建模.....	(238)
5.1.6	中性大气建模.....	(242)
5.1.7	效应模式.....	(244)
§ 5.2	空间天气预报 .....	(244)
5.2.1	空间天气预报的主要内容和方法.....	(244)
5.2.2	太阳活动预报.....	(247)
5.2.3	行星际磁场南向分量预报.....	(256)
5.2.4	地磁活动预报.....	(259)
5.2.5	相对论电子事件可预报的特征.....	(268)
5.2.6	电离层活动预报.....	(271)
5.2.7	大气活动预报.....	(272)
5.2.8	全球空间天气预报的自适应MHD方法.....	(273)
	<b>英文缩写与中文意义对照 .....</b>	<b>(277)</b>
	<b>主题词索引 .....</b>	<b>(281)</b>

# 第一章 概 论

## § 1.1 空间天气及其效应

### 1.1.1 什么是空间天气

传统“天气”的物理定义是：瞬时或较短时间内风、云、降水、温度、气压等气象要素综合显示的大气状态。日常所讲的天气，是指发生在对流层内、影响人类生活、生产的中性大气物理图像和物理状态，例如阴、晴、雨、雪、冷、暖、干、湿等。

**对流层**是大气紧贴地面的一层。它的下界是地面，上界因纬度和季节而不同。在低纬度地区其上界为17~18km；在中纬度地区为10~12km；在高纬度地区仅为8~9km。夏季的对流层厚度大于冬季。

对流层顶以上的大气处于什么样的状态，是否会影响人类的生存和发展？随着空间技术的发展，人类对从对流层顶一直到太阳大气表面这广阔空间区域的物理状态有了深入的了解。这一区域既含有中性气体，又有电离气体和高能带电粒子；既存在稳定的重力场，又有以各种时间尺度变化的电磁场。在大约60km以上，中性大气密度和温度、电离气体的电子密度等参数对太阳变化的响应极为敏感，幅度变化大。这些参数迅速而大幅度的变化还将进一步衍生出许多效应，对地面和空间的技术系统产生明显的影响，甚至使之失效。因此，人们需要像关心日常天气那样关心对流层以上的环境状态。这样，“天气”概念所涉及的空间范围自然要扩展。“空间天气”的概念就是在这一背景下产生的。

**空间天气**是一个比较新的概念，它的内容和含义仍在发展中，最普遍的一种理解是：空间天气是指瞬时或短时间内太阳表面、太阳风、磁层、电离层和热层的状态。它们的状态可影响空间和地面技术系统的性能和可靠性，危及人类的生命和健康。恶劣的空间天气可引起卫星运行、通信、导航以及电站输送网络的崩溃，造成各方面的社会经济损失。

与**对流层天气**的气象要素类似，空间天气也有相应的描述其状态的参数（也称为**空间天气要素**）。这些参数主要包括高层大气温度、压强、成分和风；电离层电子密度、离子密度和电场；辐射带中的高能电子通量、质子通量；磁层中的磁场、电场、带电粒子和电流；日地行星际空间的太阳风速度、成分、行星际磁场；太阳的电磁辐射和粒子辐射通量等。与气象要素对比，二者有许多不同。

在对流层天气中,降雨量是人们非常关心的气象要素之一。而在空间天气中,没有传统意义的降雨,但有类似的因素。如美丽的极光是由磁层沉降的带电粒子“雨”产生的。在太阳活动和地磁活动期间,会有大量的高能电子“雨”降到同步轨道高度的外辐射带。在空间天气中,人们更关心的风是太阳风。太阳风是高速运动的等离子体流,速度一般在 400km/s 左右,最高可达 2000km/s。尽管太阳风速度如此之高,但却不会刮掉人的帽子,因为太阳风的密度太小了。

上述空间天气定义强调了其消极的一面。实际上,与日常所说的天气一样,空间天气也有好、差和恶劣之分。所谓好的空间天气,指太阳表面、行星际空间、磁层、电离层、高层大气处于平静的状态,有利于运载火箭发射和卫星正常运行;所谓差的天气,是指上述区域具有不同程度的扰动;而恶劣的空间天气,就是各种“空间暴”,如强的日冕物质抛射、大耀斑、高速太阳风、磁暴、亚暴、突发电离层骚扰等。

与空间天气有关的一些物理现象也是特别有趣的,如在极区出现的绚丽多彩的极光、高层大气中出现的红闪与蓝急流。研究空间天气最重要的社会和经济方面效益,在于通过有效的警报和预报以及合理的系统设计,避免或减轻恶劣空间天气造成的不良后果。

从时间尺度的角度考虑,“天气”应是短期的空间环境状态变化。众所周知,11 年的太阳周期是最重要的**空间气候周期**,而太阳活动的 27 天重现性是空间天气最易预报的特征之一,不妨将其定为空间天气时间尺度的上限。

历史上,第一个有记载的空间天气损害技术系统的事件发生在 1847 年 3 月 19 日<sup>[1]</sup>,在英格兰观察到发报机的针自发地偏转。同年 9 月 24~25 日,最大的偏转发生在极光出现时。1859 年 8 月 28 日到 9 月 2 日,出现极光,在加拿大,电报站间的通信完全中断。在纽约、华盛顿等城市也出现类似现象。在法国,9 月 2 日一整天,所有的电报业务受到阻碍。1872 年 2 月 4 日,出现历史上所知最大范围的极光之一。在此期间,地电流极不寻常。在德国,所有的电报业务受到影响,科隆与伦敦间的通讯长时间不能进行。在英格兰、法国、澳大利亚、意大利等国也观测到地电流,用海底电缆进行通讯也受到阻碍,特别是从里斯本到直布罗陀、苏伊士到亚丁、亚丁到孟买的线路。第一个有记载的磁暴影响电力系统的事件发生在 1940 年 3 月 24 日,美国和加拿大的电力公司报告了磁暴期间的电压降、无功功率大的摆动等效应。第二次世界大战期间,英格兰的无线电操作人员确信,他们的高频无线电通讯中断是由于敌人的干扰。上述这些事件都是**空间天气效应**的早期实例。

人类进入空间时代以后,对各种空间天气现象开始进行直接观测,因而对太阳表面的扰动、这些扰动在行星际空间的演变及其对地球空间的一系列效应,都有了深入的了解。然而,“空间天气”一词过去长时间没有被公众所了解,这一方面是由于当时空间技术主要用于军事,另一方面是由于空间技术仅最近十几年才普遍地进入老百姓的日常

生活。具有广阔基础的国家空间天气服务的概念是由代表美国国家基金委、国防部、国家航空与航天局(NASA)、内务部、能源部及国家海洋与大气局(NOAA)的一个小组于1994年提出的。在此之前,包括中国在内的许多国家的有关研究部门在提供空间天气信息方面已做了大量工作,但这些工作没有组织到一个协调一致的计划里。

与空间天气直接有关的区域巨大而又复杂,空间科学所有传统领域都与空间天气的研究有关。例如,行星际大气和磁层的研究,在加深我们对支配地球环境的基本物理过程的理解方面是很重要的。类似的,等离子体和化学反应率的实验室研究,有助于提高我们观测和了解空间各种现象的能力。

空间天气变化开始在太阳表面。太阳是影响地球的电磁辐射和粒子辐射的能源。太阳活动性改变了太阳的辐射和粒子输出,在近地空间环境中以及地球表面产生相应的变化。就空间天气效应而言,最有影响的事件是太阳耀斑和日冕物质抛射。虽然太阳辐射的长期变化不会产生明显的空间天气效应,但它在帮助我们了解短期变化幕后的潜在效应方面是很重要的。太阳辐射输出的变化通过原子和分子的激发和电离直接影响高层大气和电离层的状态。太阳的粒子发射包括高能粒子和组成太阳风的低能粒子。粒子和场在从太阳外流时不断变化,特别是它们与行星际激波相互作用时。

太阳风从太阳向外流动并撞击地球。太阳风的等离子体和磁场与地球的大气层和地磁场相互作用产生泪珠状的、被称为**磁层**的区域。这个区域的表面,即**磁层顶**,在太阳向是5~10个地球半径,而在反太阳向扩展到月球轨道之外。磁层顶被认为是一个屏障,它防止除太阳风携带的一小部分能量之外的所有能量进入磁层。在正常条件下,这个能量以磁层粒子和场的形式存储,但在一定条件下,它脉动式地释放到地球的大气层。能量的脉动式释放归因于**磁层亚暴**。它表现为明亮的、变化的极光和强的电离层电流。在亚暴期间,磁层的磁场突然呈现新的位形,接着是长达许多小时的恢复时间。

**亚暴**描述了磁层对太阳风激励源相对短的响应,而**地磁暴**是对由强的、长时间(几天到几周)南向的行星际磁场的响应。这个状态产生相当大的环电流能量,因此,在**低地磁纬度**产生很大的地磁起伏。磁层离子沉降到极盖,加热中性大气并激发电离层扰动。太阳风状态返回到未受扰动情况后,磁层和电离层需要几小时或几天才能恢复到原来状态。

由于地球的磁场穿过磁层,大多数磁层过程通过某种方式与**电离层**和**热层**性质的变化联系在一起。例如,电流、极光发射、摩擦加热、电离和闪烁。所有这些现象都是近地空间天气的组成单元。这些效应也受源于低高度的过程影响,例如重力波以及来自太阳辐射和宇宙线的直接能量沉降。空间天气效应也包括在地表面感应的电流,它是电离层电流变化的结果。

以上粗略地描绘了空间天气产生和变化的一般图像。归根结底,空间不是空的,太阳不是稳定的,空间环境对不断变化的太阳的响应就构成了空间天气。

图 1.1.1 给出了空间天气涉及的主要区域。

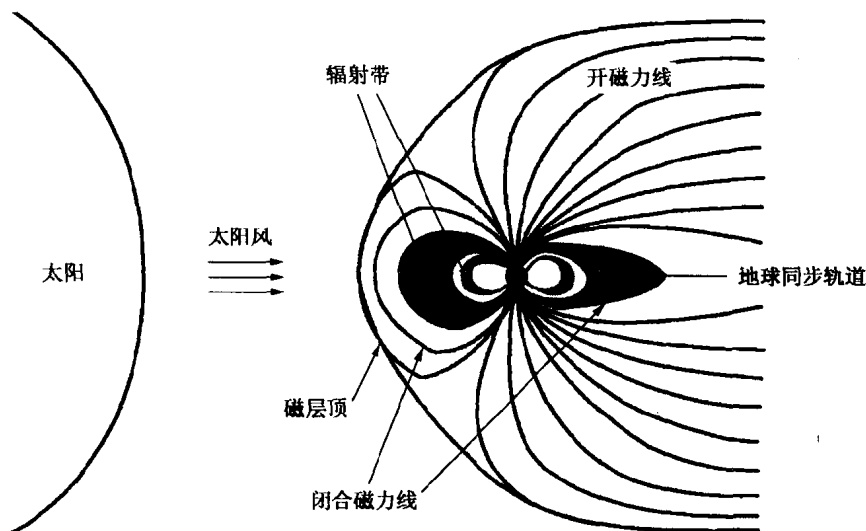


图 1.1.1 空间天气的主要物理区域

以上对空间天气系统的简要描述说明,空间天气确实包括了复杂的物理过程,而在这个复杂性上面,还要加上各区域之间的紧密耦合。因此,我们要强调将空间天气作为紧密联系的一个系统处理的重要性,如果没有关于整个系统的知识,对发生在一个区域的事件不可能单独透彻地了解。

### 1.1.2 典型的空間天气效应

空间天气与人类的生存和发展有密切的关系。随着社会的进步,人类越来越依靠高科技系统,特别是航天系统。为保证这些系统的正常运行,我们比以往更加注意空间天气的状态和预报,因为空间天气事件常常对这些系统产生严重的影响。本节只以典型事例介绍空间天气的一些效应,相关问题在第五章中详细描述。

描述空间天气状态变化的程度,对于不同的区域,都有相应的物理参数。例如,描述地磁场变化,有  $K_p$  指数,  $AE$  指数,  $Dst$  指数等。但概括说来,空间天气状态变化可分为周期性变化和非周期性变化,平静变化和激烈变化。我们将空间天气状态在短时间(几分钟到几天)内远远偏离正常值的现象称为**空间暴**。

从空间天气预报的角度来说,空间暴指所有的粒子和电磁场的强烈扰动,它们起因于太阳耀斑、日冕物质抛射(CME)、高速太阳风、磁层和电离层不稳定性。空间暴对地面和空间技术系统、航天安全、生产活动和生态环境有很大影响,因而它是空间天气预报的重点内容。

### 1.1.2.1 磁暴及其对输电系统的破坏作用<sup>[2]</sup>

太阳爆发时,高速太阳风等离子体流与磁层相互作用,使环电流及极光电集流强度大增,引起地磁场的强烈扰动——磁暴和亚暴。地磁场的剧烈变化在地表面感应一个电位差,称**地球表面电位**(ESP),这个电位差可达 20V/km。ESP 作为一个电压源加到电力系统 Y 型联接的接地中线之间,产生**地磁感应电流**(GIC)。与 50Hz 交流电相比,GIC 可看作是直流,这个直流电流作为变压器的偏置电流,使变压器产生所谓“半波饱和”,严重的半波饱和会产生很大的热量,使变压器受损甚至烧毁。近年来最引人注目的磁暴损坏输电系统的事件发生在 1989 年 3 月。一个强磁暴使加拿大魁北克的一个巨大电力系统损坏,6 百万居民停电达 9 小时,光是电力损失就达  $2 \times 10^7$  kW,直接经济损失约 5 亿美元。在这次事件中,美国的损失虽小,但亦达 2500 万美元。据美国科学家估计,此事件若发生在美国东北部,直接经济损失可达 30 亿~60 亿美元。

### 1.1.2.2 太阳高能粒子的效应

来自太阳的高能粒子不断地撞击卫星表面,高能粒子能穿透卫星的电子部件,引起电子信号电位翻转,在卫星中产生伪指令或在仪器中产生错误数据。这些伪指令会使卫星逻辑控制系统发生错误,轻则干扰卫星正常工作,重则可导致灾难性后果。低能粒子可以使卫星表面带电,特别是在磁暴、磁层亚暴和高地磁活动期间,情况更为严重。卫星表面充电时,卫星各个部件之间可能带有很高的电位差。大的电位差可使电子器件被击穿而造成永久性损坏。强粒子辐射使卫星出现故障的例子很多。例如,1994 年 1 月,一个高能电子暴使加拿大通讯卫星 Anik 失控,不得不启用备份系统,6 个月以后才完全恢复工作,损失达 2 亿美元。当时的一些报纸报道了 Anik E-1 和 Anik E-2 失效的消息。

太阳爆发产生的高能粒子辐射也会危及宇航员的生命安全。在太阳耀斑期间,空间粒子辐射通量可达到正常情况的上百倍。在美国 Atlantis 航天飞机发射 Galileo 卫星期间,宇航员眼睛感觉到高能粒子轰击所引起的闪光,这是由于能量粒子穿过视网膜神经造成的,直到质子事件过去,这种情况才减退。如果这期间在舱外活动,宇航员将受到致命的辐射剂量。

卫星在太阳爆发期间受影响的程度取决于其空间位置。如果卫星在此期间处于辐射带中,那么受影响的程度可能比较严重。

低轨卫星的“危险区”是南大西洋异常区。在那里,同一高度的粒子辐射通量比其它地区大得多,因此,卫星通过此区域时,发生的异常事件非常多。

### 1.1.2.3 高层大气密度变化对卫星轨道和寿命的影响

例如,美国 Colombia 航天飞机第一次飞行时,由于太阳爆发,造成高层大气密度大幅度上升,航天飞机遇到的阻力比以前增加 15%,幸亏带有充足的燃料,采取了应急措

施,才避免了机毁人亡的事故。美国发射的 Skylab 卫星,由于没有充分估计到临近太阳活动峰年,大气阻力增加,以致提前 2 年坠毁。美国 SMM(太阳峰年)科学卫星,在一次强磁暴开始时高度下降了 0.5km,整个磁暴期间下降了 4.8km,从而提前陨落。美国空军和海军长期以来一直监视空间的 8000 多个目标。由于粒子沉降,高纬电离层加热增加,许多目标受到的拽力发生了变化,在经历了近年来几个大磁暴以后,不少目标由于轨道参数发生显著变化而消失。高层大气密度分布表明,在中等的磁暴期间,一些区域的大气密度增加了 20%以上。

#### 1.1.2.4 电离层扰动对无线电通讯及导航系统的干扰和破坏

当强烈的太阳耀斑发生时,X 射线和紫外谱段的辐射强度在短时间内大大增加,X 射线甚至可增加好几个数量级。从太阳耀斑开始发生,在不到 10 分钟之内射线到达地球轨道,使电离层 D 层内电子密度剧增,短波无线电信号受到衰减,乃至通信中断。而在 D 层底部和地面之间以波导模传播的甚低频(10~100kHz)电波,由于 D 区电离突增,底高会突然降低,使用甚低频的导航系统的精度,取决于计算这个底高的精度,这个高度的快速变化,在确定物体的位置时可产生几千米的误差。

电离层扰动严重影响通讯的例子屡见不鲜。如在 1989 年 3 月的大磁暴其间,在低纬的无线电通讯几乎完全失效,轮船、飞机的导航系统失灵。

#### 1.1.2.5 太阳强粒子辐射对人类生存环境的影响

1965 年 2 月和 1972 年 8 月曾发生过两次大的质子事件,前一次使地面的中子数约增加了 90 倍,大气中<sup>14</sup>C 同位素增加了 10%,后一次使平流层中的臭氧长时期地减少 15%。美国 SAMPEX 卫星于 1994 年拍摄到的能量电子穿透大气层的图像表明,能量电子在中、低纬大气层的强度也很高。能量电子在大气层会产生氮的化合物,直接影响全球臭氧的分布。

臭氧对紫外线有很强的吸收作用,臭氧层的存在使不致有太多的太阳辐射的紫外线到达地面,对人类及生物起着重要保护作用。大气臭氧含量的减少,会引起海洋陆地生态系统的严重失调和恶性变化,会增加皮肤癌患者。长期以来,人们一直注意电冰箱的致冷物质氟里昂对大气臭氧含量的影响。SAMPEX 卫星的探测结果,为研究臭氧变化开辟了新的研究方向。

#### 1.1.2.6 太阳耀斑对气候和天气过程的影响

强的太阳耀斑可引起中高纬大气环流的变化,耀斑的早期效应是在太阳耀斑爆发后不到 12 小时开始的,延续时间接近一天。早期效应表现为 45°~65°的纬度范围,等压面高度有增加的趋势;在 70°以上的纬度范围等压面的高度有减少的趋势,300hPa 等压面的效应最大,冬季效应最弱,在某些地理位置最显著。有的统计结果表明,在耀斑后第 3 天和第 4 天内的雷暴活动增加,在耀斑后 10 天内最频繁。



我国在太阳活动对气象影响的研究方面做了大量工作,有些成果已经用于地区的长期和超长期降雨量预报。

上述由于空间暴所造成的损失,如果对暴的发生能提前作出准确的预报,都可以使之避免或降低。例如,如果事先减少电力系统的负载,就可以避免磁暴对输电系统的破坏。在发射卫星时,选择合适的发射时间和轨道参数,也可以避免太阳爆发所造成的危害;对于已在轨道上的卫星,如果事先知道何时会发生空间暴,也可以通过地面控制系统密切监视卫星的所有指令,及时排除由于单粒子翻转所产生的伪指令。对于使用磁定位的卫星来说,在空间暴发生之前知道同步轨道的磁场分布是很重要的,因为在强磁暴期间,同步轨道卫星穿越磁层顶进入磁鞘时,磁场常常反转,因此,姿态控制可能出现方向性错误。

对空间暴的预报,是空间天气预报的重点,但不是全部。其它方面的预报工作也是很重要的,如太阳活动不同时间尺度的周期性变化、电离层特性的某些规则变化、中高层大气密度的长期变化、地磁场的周期性变化,特别是长周期和超长周期的变化等等,对人类的生存和发展都有重要意义。同样,对于磁静日的预报,也是很重要的。

### 1.1.3 空间天气业务

空间天气与对流层天气有许多类似,因此,空间天气业务活动在很大程度上要利用气象服务的经验。概括来说,主要的业务活动包括观测、数据传输和处理、研究、建模和预报,最终向用户提供空间天气产品。

#### 1.1.3.1 空间天气产品

空间天气业务向用户提供的产品主要有预报、警报、现报和已往事件分析服务。

**空间天气预报**——与大气层天气预报类似,覆盖各种时间尺度和准确度。长期范围的太阳活动周预报根据太阳活动的模式,但对现行事件的定时缺乏准确性。根据太阳和太阳风观测、实地磁层数据和模式的短期预报可覆盖几小时到几天。

**警报**——空间环境即将发生强烈扰动,可能对卫星、近地空间或地面的设备和人类产生危害,应引起有关方面的密切注意。根据对原因事件的观测(如太阳耀斑)、实际事件的观测(如磁暴起始)或趋势推断(如质子通量增加),警报一般提前0~24小时发出。类似于气象中的台风、暴雨等来临时发出的警报。

**现报**——准实时发布的空间天气状态,有时也包括警报(如果事件正在进行)。

**已往事件分析**——用于辨别空间天气因素,分析受空间天气影响的系统操作异常。当异常发生时,观测对于分析空间环境状态是关键因素。立即进行的已往事件分析,可以辨别卫星通讯故障是工程原因还是空间天气原因。

扩大空间天气产品的用户对发展空间天气业务是最关键的问题,因为社会需求是产品发展的基础和动力,而空间天气产品又没有明显的市场,所以,了解这些产品是否