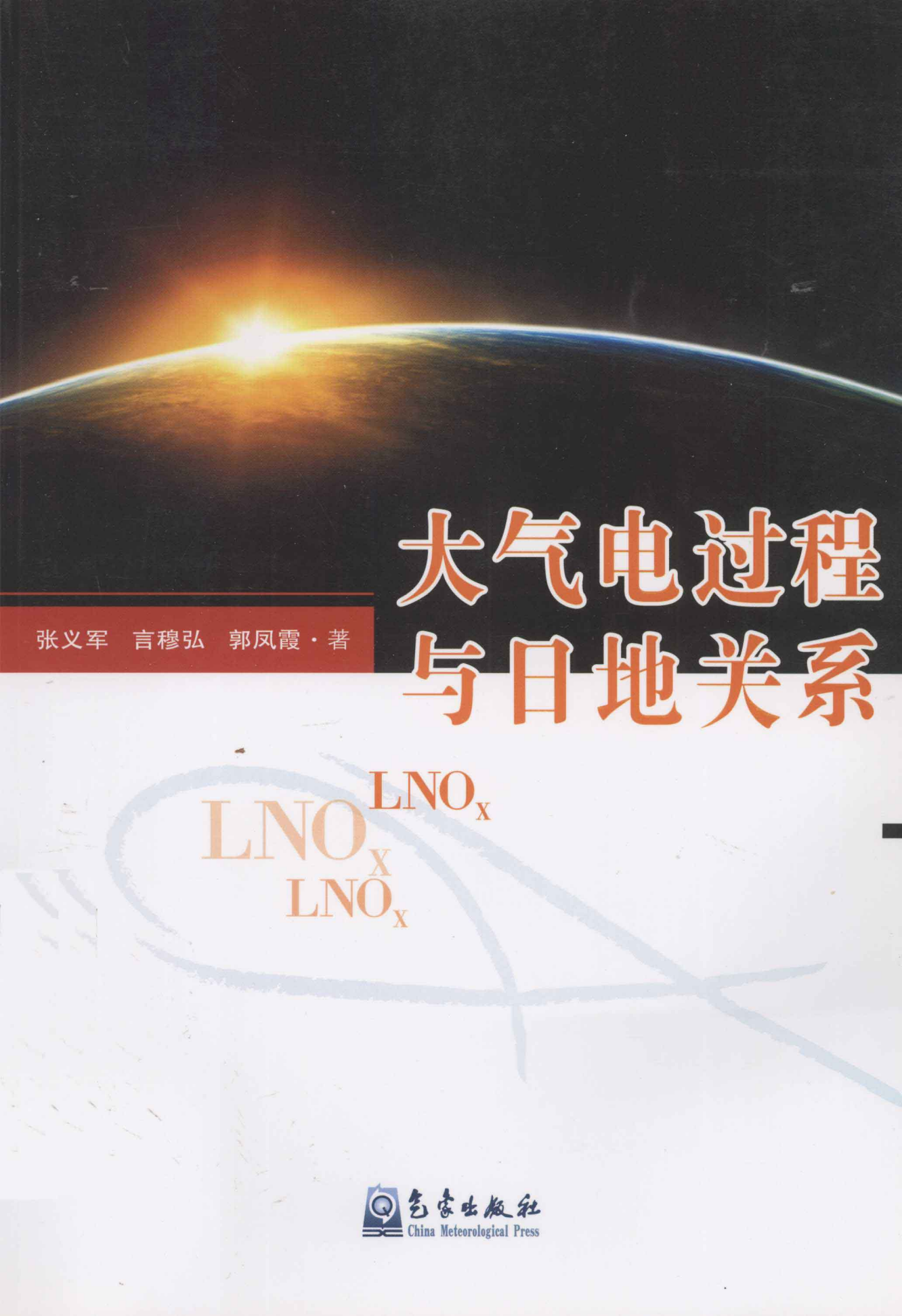




大气电过程 与日地关系

张义军 言穆弘 郭凤霞 · 著

LNO_x
 LNO_x
 LNO_x

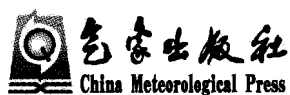


气象出版社

China Meteorological Press

大气电过程与日地关系

张义军 言穆弘 郭凤霞 著



内容简介

本书从大气电磁过程及其与太阳活动参数的耦合角度来研究日地关系,首先介绍相关统计事实,然后从全球电路概念讨论耦合机制,即太阳活动是如何通过对全球大气电参数的调制来影响天气气候。书中还讨论了闪电产生氮氧化物(LNO_x)的化学过程及其与天气气候之间的可能联系。最后还讨论了银河系、太阳和地球(外层大气和内部地核环流)之间的一种磁耦合机制。

本书在“日地关系”研究领域为读者提供一个平台,适合该领域研究者阅读,也可作为高等院校大气科学研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大气电过程与日地关系/张义军,言穆弘,郭凤霞著. —北京:
气象出版社,2010.7

ISBN 978-7-5029-5006-4

I. ①大… II. ①张… ②言… ③郭… III. 大气电-日地关系
IV. ①P401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 119381 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:吴晓鹏

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:320 千字

版 次:2010 年 10 月第 1 版

印 数:1—2000

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:12.25

印 次:2010 年 10 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元

前 言

2009年7月作者撰写出版了《雷暴电学》一书,该书从电磁学角度讨论了强风暴内的电荷结构、起电和放电过程及其与动力过程、微物理转化过程之间的关系。首先介绍了大量观测结果,然后采用数值模拟方法作系统分析。在撰写过程中,作者感觉雷暴中的电活动过程除了与其本身的动力、微观过程有关之外,还与外界环境有关,尤其是与维持地球“生命”的太阳及其各类爆发活动密切相关。因此,作者试图从这方面做个总结,并结合多年来在该领域的研究工作,从大气电活动过程的角度来讨论太阳活动与地球上天气气候变化之间的可能耦合关系。

在日地关系研究中,有很多不同物理、化学过程之间的耦合,本书是从太阳和大气电磁过程耦合角度来讨论日地关系。书中还涉及闪电产生氮氧化物(LNO_x)的化学过程及其与天气气候之间的可能联系。最后还简单讨论了银河系、太阳和地球(外层大气和内部地核环流)之间的一种可能磁耦合机制,即“变压器效应”。试图研究地球磁场超长期变化尤其是极性反转的天文原因。全书共分6章,第1章引论,简述有关研究中的基本问题,以及大气电活动的可能作用。第2章介绍太阳活动基本属性和可能响应的地球物理效应,寻找优势耦合地球物理参数。第3章引出全球电路概念,讨论雷暴发电机效应,及其与太阳活动、高层大气活动之间的耦合关系。第4章讨论太阳活动如何通过对全球和局地大气电过程的调制来影响天气、气候过程。基于大量基本的观测事实,提出了一些日地电耦合的可能机制。第5章总结介绍了闪电产生氮氧化物(LNO_x)的过程和机制,以及区域和全球性分布,并讨论了对全球气候的可能影响。第6章是银河系、太阳和地球之间可能的磁耦合机制介绍。本书所涉及内容较大部分是探索性的,提出的一些耦合机制,虽然尽可能做到立论有据,但由于缺乏大量观测事实的验证,其可靠性还有待商榷。尤其是第6章介绍的日地磁耦合机制,即“变压器效应”,只是一个初步设想,作了一些简单计算。由于其涉及领域面太广,地层观测数据又很缺乏,理论上又是一个超难度的数学问题,所以其可靠性尚需作更深入的研究。因此,本书只是在该领域的研究中为读者提供一个平台,更深入研究尚需依靠读者自己的判断和创新。

本书内容主要是介绍作者自己的研究工作,但为了论述的完整性和系统性,书中还大量介绍了相关研究动态。随着全球变暖,气候变化的发展,除了考虑人类活动影响之外,日地关系研究也逐渐被推向一个新高峰,成果卓著。全书由言穆弘统稿,张翠华工程师编辑,参加本书研究工作的还有杜健、安学敏、申巧南等。

本书介绍的只是一个初步的研究结果,加之作者水平有限,错误、遗漏之处在所难免,望读者指正。

作者

2009年9月

目 录

前 言

第 1 章 引 论	(1)
第 2 章 太阳活动属性和相应地球物理效应	(3)
2.1 太阳活动属性	(3)
2.2 地球物理效应	(8)
第 3 章 全球电路和雷暴发电机效应	(15)
3.1 全球电路	(15)
3.2 雷暴发电机效应	(21)
3.3 大气电效应	(40)
第 4 章 关于太阳—天气反应	(63)
4.1 近代观测结果回顾	(63)
4.2 相关分析	(65)
4.3 日地电耦合机制	(83)
第 5 章 闪电化学过程(LNO_x)	(96)
5.1 概述	(98)
5.2 主要观测计算结果	(99)
5.3 LNO_x 产生和传输机理及计算方法	(102)
5.4 全球和区域 LNO_x 时空分布	(117)
5.5 LNO_x 模式研究	(139)
第 6 章 日地磁耦合机制初探	(148)
6.1 地球磁场及其变化	(148)
6.2 日地耦合机制—变压器效应	(162)
参考文献	(173)

第1章 引 论

地球吸收太阳输出能量才能维持其“生命”，太阳输出能量变化必将影响地球上的天气与气候，研究它们之间的关系即“日地关系”已经历了一个世纪之久，但是还没有肯定的结论可以被广泛地接受。其原因是多方面的，可以总结以下几点：一方面在于太阳活动参量和天气、气候之间的相关联系并不是肯定的，有时会中断，甚至会出现异常矛盾的结果；更重要的是找不到一种可以被接受的物理概念和机制来解释这种相关联系。此外，太阳活动所产生的能量变化和推动天气、气候变化的能量相比较，是很渺小的，这不足以形成相关联系，充其量或许是一个触发扰动作用。事实上，太阳活动引起太阳辐射能量的变化小于1% (Smith, 1975)，不可能引起能量上的突破。有人认为太阳活动可以先引起高层大气例如热层的温度变化，然后影响低层大气，但研究发现高低层大气之间的能量耦合很微弱 (Dickinson, 1975)，Robert (1973) 又认为太阳活动可以加热 300 hPa 高度的大气温度，从而形成卷云，而卷云又能减小该高度处的水汽冻结率并得到净热量，于是导致动力过程，形成涡度。即使如此，上述过程需要几天时间。但观测证实，太阳活动引起 300 hPa 高度涡度区域面积指数增大的时间延迟不超过 1 天 (Olson, 1975)。所以该机制无法解释时间上的对应。

但是，越来越多的观测事实证明太阳活动和天气、气候之间存在着某种联系。例如一个多世纪以来美国地区发生的干旱都有着 22 年的周期性 (Marshall, 1972)；历史上冰期 (1645—1715) 即蒙德极小期 (Maunder Minimum) 时段内几乎观测不到太阳黑子 (Eddy, 1976)；1986 年是太阳宁静年，却发生了特大 4 级耀斑爆发，地球上许多地方发生洪水和风暴。这些现象又使人们相信存在着一种物理机制来联系“日地关系”。

这些理论的建立存在着很多障碍：众所周知，太阳能量是以各种各样的形式来到地球的，其中大部分太阳能量会被地磁场分离开，且在不同经、纬度和高度上作不同的配置，同时转化成热量，用来驱动大气环流和相应的分环流 (Mitchell, 1965)。所以，在总体上统计太阳活动和天气、气候之间的相关性，显然是不妥的，因为太阳活动的形态，及其时空变化和它们所伴同的地球物理响应在不同地理区域和不同高度上是不同的，后延时间也不同。

此外，太阳热量输送到赤道和两极地区是不同的，不均匀的。也正是这种不均匀才造成了大气环流及其变化。热量从赤道输送到两极的过程中大洋比大气更为重要，大洋温度和洋面环流的变化将影响大气热量分布的改变，从而引起天气、气候的相应变化，以及极地冰冠的不同程度伸展和变化也将引起全球天气、气候变化；地球轨道变化将改变到达大气层顶部的太阳能量，以及太阳系穿过银河星际云系时也可能影响地球长期气候。凡此种种都能引起地球上天气、气候的相应变化。于是“日地关系”就变得很为复杂。它有着许多似乎与太阳活动无关的反馈作用和衍生效应，甚至会将太阳活动的影响掩蔽掉。所以“日地关系”研究一定要找到与太阳活动直接有关的参量。

本书从大气电学角度来讨论“日地关系”。由于大气电学与其他学科 (例如天气和气候，高

对流层和平流层大气)中的一些特殊气象参数之间有很紧密的联系,而前者与太阳活动的耦合是显著的。近代很多研究也指出,太阳活动和大气电参量之间的联系是广泛的。太阳活动可以改变平流层、对流层大气的电离;可以改变电离层电位,晴天电场和气—地电流;可以影响全球雷暴活动等。这些影响并不是太阳能量的增加,只是使平流层和对流层中已经存在的大量能量作重新分布和可能的释放。因此,避免了能量困难、耦合困难以及时间上的不同延迟。本书将讨论这种“日地关系”。为了评价它以及深入研究的需要,必须首先讨论许多太阳物理现象和过程。以及太阳活动在地球物理上的反应。为此必须注意以下特点之间的区别:

(1)初级太阳—地球物理过程和反应。

(2)太阳—天气关系,包括在大气电学方面的次级反应。

(3)太阳活动和大气电学之间的直接物理联结。

为了讨论(2)和(3),必须考虑两个近似,即(a)太阳活动事件和大气电反应之间的显著统计相关性被证实。(b)太阳活动类型和大气电反应之间存在着物理上有根据的因果联结解释,即统计相关性必须显著且有合理的物理解释。当然作上述近似会引出某些误差以及处理过程简单化,从而会失去某些信度。但是,这种近似是有根据的,也是有价值的,且有可能提出值得进一步研究的目前尚不清楚的物理因果联结。

Herman(1985)和 Reiter(1992)关于大气电学在“日地关系”中的作用作过全面的总结。该书从大气电学角度出发,对太阳活动和天气、气候之间的短、中、长期相关性作了全面总结,并对可能的耦合物理机制作了简单介绍。我们从另一角度,即从雷暴电学出发,以雷暴电活动及其相应的化学过程为引线来讨论“日地关系”,还引用了他们很多资料。

第 2 章 太阳活动属性和相应地球物理效应

2.1 太阳活动属性

太阳活动的基本量度是任一时间太阳圆面上可见的太阳黑子数,黑子数越多,表示太阳活动越强,一次太阳活动可导致可见光、紫外线与 X 射线等频谱电磁能量的部分爆发,产生很强的电磁辐射。有时甚至在微波射频频段内也产生很强的电磁辐射。此外,像耀斑爆发这样的太阳活动事件还经常喷射出大量的相对论性的带电粒子。例如 α 小粒子,质子以及电子等,其中主要是太阳质子。由于太阳磁场基本上是“冻结”的,所以太阳磁场也随同这些电磁辐射和带电粒子接近地球,从而在地球上产生很多相应的地球物理效应。在介绍日地关系研究结果之前,我们先列举和简单解释一些很重要的、通常被利用的一些太阳活动现象和特征,且较多注意它们的时间过程和可变性。

2.1.1 太阳黑子

太阳黑子是太阳活动中最有代表性且是周期性变化的一种经典现象结构。它常作为太阳活动的一个基本标志而被长期监测。它的第一次记录被发现于公元前 800 年中国出版的一本《太阳变化》书上。500 年以后,随着星际望远镜被发明,许多学者相应发现了太阳黑子。此后,直到 1848 年瑞士天文学家 Wolf 首次提出太阳黑子数(R)概念,且一直被引用至今。由于太阳磁场以及太阳表面不同物质的差异旋转,在光球表面会形成一些相当暗的,且有明显界限的区域,这就是“太阳黑子”。它的中心是一个深黑色核即本影,温度约 1500K,是光球温度的四分之一,外围是具有丝状和米粒状结构的浅黑色半影区域,温度比本影高些,呈团状结构排列。太阳黑子尺度约 10^4 km,生命期从几天到几年。通常是成对出现,即由两个相反磁极性的黑子合群出现。在两个黑子之间的弓形区域内有强烈的磁场形成,从而减弱等离子流的对流强度,使黑子区域温度降低,且减弱太阳内部的等离子体热流向光球表面输送。一对黑子类似于一个磁偶极子,形似一个开放的、方向向上的 U 型磁铁,嵌在光球等离子体内。正和负磁极性的排列在太阳半球中通常是镜像对称,且呈现周期性变化。当一个黑子周期开始时,黑子首先出现在日面较高纬度处(约 $25^\circ \sim 45^\circ$ 纬度)。然后随着周期逐渐向赤道方向移动,最后在赤道附近(约在 5° 纬度以内)消失。周期平均持续时间约 11.1 年。在周期中期,太阳黑子数达最大,太阳黑子数 R 可用下式表示: $R = k(10g + f)$ 。式中 g 是黑子群数, f 是个别黑子总数, k 是一个标准化常数。 R 又称 Wolf 数。

太阳黑子随同太阳自转,且是非线性自转,即日面不同纬度处旋转频率不同,低纬度区域转速比高纬度区域要快。这就导致新出现的黑子对磁场极性和刚消失的黑子磁场极性相反。即具有双极性黑子的磁极性变化,考虑到磁性反转,于是就出现了 22 年太阳黑子周期即 Hale 周期。此外,尚需考虑太阳自转,即日面不同纬度处太阳自转周期不同,赤道处为 25 天,两极

处为 35 天,通常取平均自转周期 27.27 天。因此,太阳黑子也有约 27 天重复出现周期,从而使产生的地球物理效应也受到 27 天调制。当然,太阳黑子数还有其他周期变化,例如 90 年周期,且在周期性变化中呈现一些不规则性。但 11 年周期是显著的,且每个周期变化的斜率也不同。

太阳黑子数作为太阳活动的一种量度,通常只适用于较长周期变化,用于讨论与长周期天气和气候变化的相关性。例如公元 1550—1850 年地球上的小冰期可能与公元 1400—1510 年太阳黑子数 Sporer 低值期以及公元 1646—1716 年 Maunder 低值期相关。但对于一些短期的地球物理效应,用太阳黑子是不可靠的。它通常与一些伴有强烈的高能粒子和电磁射线发射的太阳活动事件有关,而这些事件在太阳黑子数极小年份同样能发生。

一次重大的太阳黑子事件使太阳辐射输出即太阳常数有很微弱的变化,通常小于 0.1% (Smith, 1975)。而太阳常数在太阳自转 27 天周期内也有 0.1% 变化。因此,这种微量变化无法引起地球上任何天气、气候变化。任何地球物理参数都不可能直接和太阳黑子数逐日、月精细结构发生相关。因此,在日地关系研究中,只有在长期黑子周期的相关性研究中,太阳黑子才有意义。

2.1.2 太阳亮区

太阳大气从太阳内部向外可以分成光球,色球和日冕三层。在太阳黑子周围常会看到一些发亮的区域即所谓太阳亮区。在光球层上的亮区称为“光斑”,扩展到色球层则称为“谱斑”。进一步延伸到日冕层,称之为“日冕凝聚区”。它们的生命期长于太阳自转周期。尤其是谱斑区,它表征了一个“活动中心”,它出现于光球层以上 1500 km 高度的色球层内,尺度可以大到几十万千米,谱斑的亮度、温度以及磁场强度远大于色球层宁静区,产生很强辐射,主要谱线为氢和钙,故又称为“氢谱斑”(或称 h_{α} 谱斑)和钙谱斑(或称 K 谱斑)。当 K 谱斑联结成群,则意味着一个“活动中心”产生,亮区达到了最大亮度和稠密度,远紫外辐射, X 射线和电磁辐射强度激增,且常伴同会发生 H_{α} 大耀斑爆发。K 谱斑指数与 H_{α} 耀斑爆发有很好的正相关性。在氢谱斑中较少见到耀斑爆发,通常它与黑子周期相位无关,但在黑子活动高年, K 谱斑指数明显高于黑子低年。因此, K 谱斑活动中心也是太阳活动的一个标志。

此外,日冕的范围非常广,一直延伸到行星际空间,甚至包括了地球轨道。日冕由温度约 10^6 K 的等离子体构成,结构复杂而不稳定。它有一个暗黑色的扇形区域称为“日冕洞”。“日冕洞”被谱斑群连接。在太阳宁静期,日冕被浓缩在太阳表面附近。在太阳活动期,日冕向外扩展,日冕洞也迅速增长,日冕气体即由电离氢、氦和氧组成的太阳风,以 $150\sim 700$ km/s 的速度向外传播,产生强烈的 X 射线和超紫外线辐射,影响地球大气。太阳风及其长周期变化是太阳活动中的一个参量。

太阳活动的另一个重要参量是太阳磁扇结构。太阳一行星际磁场是由太阳等离子体形成,是一个以太阳为中心的阿基米德螺旋,离太阳而去弥散于行星际空间,且将空间划分成交叉的螺旋形磁扇面,分成 4 个扇形区,方向交叉向外(+)或向内(-)。在太阳活动宁静年,磁扇结构稳定少变化,在太阳活动高年,磁扇结构发生漂移且强度增大,在每个磁扇边界处强度增大 3~6 倍。在两个磁扇边界处磁场极性反转。磁扇结构随太阳自转而旋转,故磁扇边界会轮番扫过地球,有 27 天周期。而地球在黄道平面上约偏离太阳赤道 7.25° ,所以地球绕太阳公转一次可能有 2~4 个相反极性的磁扇面扫过地球。一般在 12 月 7 日到次年 6 月 7 日期间是

太阳南极向着地球,即行星际磁场为负;而6月7日到12月7日是太阳北极向着地球,磁场为正。所以在6月7日和12月7日两天行星际磁场发生极性反转。这种年变化叠加在27天周期上,造成5—6月,和11—12月期间会出现更多的磁扇边界扫过地球。磁扇边界扫过地球时常伴随快速太阳风出现,且很多太阳活动都与磁扇边界有关,例如耀斑爆发常出现于磁扇边界层的根部。磁扇边界结构和太阳风,钙谱斑及日冕结构之间有很强的物理相关性,也与银河宇宙线强度有关。

综上所述,太阳黑子、光斑(尤其是谱斑)和日冕结构(日冕洞)等是太阳活动出现的重要标志,而太阳活动影响地球的重要参量对于中、长期而言是太阳风和磁扇边界结构。

在日地关系研究中,太阳黑子数适用于长周期相关性研究。钙谱斑、日冕结构和磁扇边界结构适用于中周期相关性研究。

2.1.3 短周期太阳活动事件

2.1.3.1 太阳 H_α 耀斑

光学耀斑 H_α 是最激烈的太阳活动参量之一,它发生在上节所述的“活动中心”区域。称它为 H_α 耀斑,因它是一种瞬变现象且具有标准 656.3 nm 暗色夫琅和费谱线的极亮度,它在短时间内(约 10~15 min)能产生相当大的能量(约 $10^{25} \sim 10^{26}$ J),伴随辐射能量也大大地增强,且相对集中在几个波段,例如 X 射线辐射能增长上千倍,射电辐射波段增大几百倍以及紫外线(UV)和超紫外辐射(EUV)也大幅度增强。按照强度、覆盖面积和历时长短, H_α 耀斑可分成 S 和 1, 2, 3, 4 级, S 和 1 级最弱,出现频数也最高。3 级以上耀斑较少出现,仅占 2% 左右。 H_α 耀斑的强度和频数与太阳活动位相有关,通常多出现于太阳黑子数高年份内,但也有例外,例如 1986 年 2 月 4 日爆发了一次 4 级大耀斑,且时值太阳活动低年。耀斑多发生在太阳黑子群附近,或在太阳磁扇边界附近, H_α 耀斑的另外指标是: n 表示正常耀斑, b 表示光亮耀斑。

3 级以上 H_α 耀斑会导致行星际空间扰动,太阳磁能被快速释放,等离子体被快速加热,带电微粒流在磁场中被加速,迅速喷射扩展到行星际空间,领先者是 >1 GeV 能量的高能相对论粒子,紧接着是中等能量粒子($>40 \sim 100$ MeV),最后是慢速粒子(<15 MeV)。由于质子倾向于沿行星际磁力线运动,所以首先到达地球环境。一般而言,喷射的高能粒子最后随太阳风在 1~2 日内到达地球环境。从而部分压缩磁层,地磁场水平分量突然增加,触发一次地磁暴,有时也会在磁层和电离层中引起强烈的电流。

综上所述, H_α 耀斑是重要的短周期太阳活动事件,在其爆发 1~2 日后,从地表一直到高层大气在所有纬度上将会伴随产生不同性质的地球物理效应。在日地关系短周期研究中是一个重要参量。它除了有直接效应外还会有许多次级现象。

2.1.3.2 太阳质子事件

在前节所述的“活动中心”有时会爆发喷射出极高能质子流(约 25 GeV)称之为“太阳质子事件”。它们能穿透地球大气直到地表面。而耀斑爆发产生的高能粒子流是不能穿透地球大气到达地面的(通常截止能量约为 4~5 GeV,不同经纬度有所差别)。太阳质子事件是相当稀少的,例如 1942—1978 年期间只观测到 31 次太阳质子事件,其持续时间也相当短,仅几分钟,很少能维持几个小时。因此,尽管太阳质子事件在太阳活动中很重要,但在日地关系研究中因持续时间太短而显得不重要。

2.1.4 太阳活动载体

前面介绍了不同周期的太阳活动事件,本节介绍这些事件中能够影响地球环境的载体。

2.1.4.1 太阳总辐射

太阳大部分能量以电磁辐射形式向外发出,且 99.9% 集中在可见光、红外和紫外波段。这些辐射是造成大气环境和随之而来的天气变化的主要能源,在外层大气测量到从远紫外到红外整个频段的积分太阳总辐射(太阳常数)为 1368 W/m^2 ,且基本恒定,太阳活动期间有微弱漂移,卫星观测指出,平均 10 年,太阳常数变化了 0.05%。由于太阳自转及圆面上黑子和光斑的影响,太阳总辐射会有周期性变化,从功率谱分析,其周期性复杂,主周期是 27 天。黑子和光斑的扰动,太阳总辐射会有微弱变化。这些变化不足以引起任何地球物理效应。

2.1.4.2 太阳短波辐射

在太阳总辐射频谱中,在 $0.1 \sim 10^4 \mu\text{m}$ 波段内,太阳活动不引起辐射波功率偏离,但在紫外、远紫外、X 射线以及伽马射线范围内却有较强波功率偏离。尽管这些辐射贡献仅占太阳总辐射约 1%,但却和地球物理效应密切相关。当有强烈的太阳风和耀斑爆发时,上述射线强度量级会增强。对于吸收带而言,从长波一直到可见光频段,氧分子吸收带是最主要的。紫外线波段是平流层中臭氧吸收带占优势,臭氧吸收了紫外辐射能量,维持了热层,中间层和平流层的热量平衡,是主要能源。高层大气的电离是要依靠来自银河系的宇宙射线,以及远紫外辐射、X 射线以及伽马射线和太阳风等。因此,随着太阳活动增强,上述短波辐射也增强,于是地球大气中的电离粒子浓度、温度以及电子浓度也增大。此外,紫外辐射增强,会引起平流层中的臭氧含量变化以及大气扰动,远紫外辐射增强,将增大热层中的电离度,并产生大量丰富的氮氧化物 NO_x 。Keating(1987)研究指出,远紫外辐射(EUV)在日地关系研究中是一个很重要参量。因为 EUV 与太阳活动显著性相关,且随时间变化很强烈,它可以在平流层大气中直接引起一系列物理化学过程。但是,由于紫外和远紫外辐射在日地关系研究中因其资料不充足而存在困难。研究发现,被太阳活动引起的紫外,远紫外强度变化和 10.7 cm 射电通量的变化之间有非常明显的相关性。因此,可以利用 10.7 cm 射电参量作为一个指标来替代紫外和远紫外辐射。

2.1.4.3 太阳 10.7 cm 射电通量

利用射电望远镜可以观测厘米、分米和米波段射电辐射。全球有三个著名的射电辐射观测站:渥太华(加拿大,Herzberg 天体物理研究所),剑桥(美国,麻省空军剑桥研究所)和 Toyokawa(日本,国家天体物理现象台)。在日地关系研究中,10.7 cm(2800 MHz)射电辐射通常被广泛应用。这是由于它和太阳短波辐射显著相关,尤其与紫外及远紫外辐射强烈相关。一些研究也指出,它与 H_α 太阳耀斑爆发也相关,通常在爆发前 6~8 天,10.7 cm 射电通量开始增加,在爆发后慢慢降落,且在耀斑爆发前后是对称的。所以,10.7 cm 射电通量是太阳活动中短周期变化的一个很好指标。

2.1.4.4 太阳微粒流

强烈的太阳风,耀斑和质子爆发事件还能喷射出大量的高能相对论粒子,主要是电子和质子以及一些重核粒子。此外,在太阳磁单极区以及太阳日冕上较冷的区域(日冕洞)上还稳定

地喷射出一些低能质子、电子流,它们可以被加速到 $300\sim 900\text{ km/s}$,在地球附近数浓度可达 $10^6\sim 10^7/\text{m}^3$ 。同时微粒流也携带太阳磁场进入行星际空间,在地球附近场强约为 10^{-9} 特斯拉。

由于地球磁场作用,这些微粒流不能进入地球的所有地磁纬度区域,只能从地球高磁纬区域(约磁纬 50° 以上)进入高层大气。它们极大地增强了高层大气电离度,在两极可以观测到所谓极冠吸收(PCA)现象,一般可以维持 $1\sim 5$ 天,在大耀斑爆发时可以持续更长时间,并且能穿透到平流层大气约 25 km 高度层甚至更低,从而增强了平流层大气电离度。此外,沉降在高层大气中的高能微粒流还可以通过产生次级 X 射线,穿透到低层大气,影响大气电离。

太阳微粒辐射(通常以 PCA 事件为标志)和磁暴急始及地磁暴之间有很好的相关性,几乎一一对应。通常在 PCA 事件后约 20 小时左右出现磁暴急始,接着发生地磁暴。

2.1.4.5 初始银河宇宙线(GCR)

在以前章节中,我们已指出必须严格区分来自太阳(太阳质子,较少能到达地球表面)和来自银河系的宇宙射线,银河宇宙线多数能穿透整个大气层。本节介绍 GCR 某些主要特性。Hess(1912)在自由气球观测中发现了 GCR,认为是几千米高度以上大气中的电离源。另外,研究宇宙线的先驱是 Regener(1937)和他的同事们,他们在康世坦世(Constance)湖附近进行测量研究。Ray(1961)对平流层气球飞行测量的历史结果作了评述。能量超过 2.5 GeV 的 GCR 质粒子主要由质子组成(占 99% 以上),少量是氦核(α 粒子)约占 1% 。其他一些轻的和重核甚至电子能被忽略。GCR 核能量变化从约 100 MeV 到 10 GeV (甚至更高),且最大频数约在 200 MeV 。多数可靠结果是被超级中子监测器得到的,在中子仪中宇宙线核被测定,是通过间接测量空气中的次级产生的慢中子得到的。能量 $< 10\text{ GeV}$ 的质子和其他核的能量谱受行星际磁场影响很大。在整层大气直到气压为 0.1 g/m^2 高度层上,GCR 通过电离产生高能电子。此外还有些 X 射线,这些粒子具有足够能量,足以克服地磁场的调制而进入地球大气,大部分能和大气中的原子核和分子发生碰撞,产生次级辐射,新产生的介子和中子又能导致第二次碰撞,从而使各类粒子不断倍增,出现一种级联过程。产生的粒子能通过各种方式深入中低层大气,能量极大的粒子还能穿透到地面,增强大气电离。宇宙线粒子在射向地球的行进途中受到太阳风磁场、磁扇边界的调制。同时又受到地球磁场调制。所以进入地球大气的宇宙线强度与各类太阳活动密切相关,受太阳活动调制。因此,宇宙线强度也有 11 年周期变化,且低能宇宙线更明显,且和太阳黑子数呈反相关。平均从太阳黑子数极小年到极大年,宇宙线强度减小约 7% (赤道) $\sim 21\%$ (中纬度),且这种变化越高越明显。GCR 还有一个 27 天周期,变化幅度在行星际空间为 10% ,但在地面很小,仅 $1\%\sim 2\%$ 。

宇宙线所致大气电离化率几乎 100% 被太阳活动调制,与太阳黑子数呈明显反相关,且有明显纬度效应,在磁赤道最低为 $10\text{ 对}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。随纬度增加而增加,在磁极区为 $70\sim 100\text{ 对}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。且在磁纬 $50^\circ\sim 60^\circ$ 处形成一个拐点,此后随纬度增加电离化率变化很小。这表明在此转折纬度以后的高纬度区,宇宙线基本上能全部进入地球大气。转折纬度在黑子数低年为 63° ,高年为 56° 。

宇宙线电离化率也随高度变化,从地面到 60 千米 高度处平均变化为 $0.1\sim 50\text{ 对}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$,地面约为 $10\sim 15\text{ 对}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。在对流层顶附近达到极大。

银河宇宙线对大气电学的贡献不是电荷沉积,而主要是通过电离化改变了空气电导率。

太阳活动通过改变进入地球大气的银河宇宙线强度来改变大气电离化率,一般在 8~10 km 高度间,电离化率可以改变约 10%。这在模式计算中是一个重要量。此外还需指出,GCR 能够产生 NO(NO 源地在平流层大气层),且其变化规律以及和太阳活动的相关性和高度的关系和电离化率完全类似。

GCR 一个有名的不规则变化是福波希减小(Forbush Decrease, FD)。FD 是太阳能耀斑爆发后银河宇宙线强度减小。在地面减小可达 30%~50%,高层减小较多,10~15 km 高度上减小可达 40%~70%(Webber,1962)。耀斑爆发产生的磁流体动力扰动传播到地球空间,使 GCR 在一个确定的时间段内发生漂移,且具有全球性。这种 GCR 降落首先被 Forbush (1937)发现,后被 Dorman(1974),Kaminer(1981)等理论计算证实。Shah(1981)区分了三种类型的“FD”,(1)非重复性 FD,是被强太阳耀斑冲击所致,此时行星际磁场被加强约 10 倍,同时扫过银河宇宙线。(2)重复性 FD 是被高速太阳风急流所致。(3)重复性 FD 是在“AC”活动中心中被一系列太阳耀斑触发。

“FD”与地磁场磁暴密切相关,“FD”与地磁 A_p 指数显著性相关,出现磁暴时,在该时刻 A_p 指数急剧增大且达到最大,而同时“FD”达到最小。此外,分析电波传播指数与 FD 的时序变化也发现,在“FD”开始前 5~6 日电波传播指数已开始降落,并在“FD”开始日达到最小。而电波传播与电离层扰动有关。这也说明了“FD”与电离层扰动之间的间接联系。

“FD”和磁扇边界之间也有很好的联系。总之,“FD”以及它的一系列特性是反映激烈太阳活动事件的一个最好和最重要的信号。

2.2 地球物理效应

太阳活动通过上述载体影响地球及其大气,从而产生多种地球物理效应。这种影响尤其对高层大气和地球磁场最为显著。

2.2.1 电离层扰动

电离层扰动是由太阳事件和辐射变化引起的。电离层主要分为四层:D 层(60~100 km),E 层, F_1 和 F_2 层(150~600 km)。D 层空气电离是由于莱曼- α 太阳紫外辐射(121.6 nm)和低能银河宇宙线和太阳质子,电子的作用而引起的。负电荷载体是 O_2^- 和电子。E 层白天和晚上的特性相差很大,其电子浓度和高度取决于太阳天顶角和太阳活动。 F_1 层亦然,主要依赖于太阳 30.4 nm 波长的电离辐射。 F_2 层变化最为激烈,与太阳活动、昼夜和季节变化有关,且有纬度效应,但与太阳天顶角变化无关。电波通信(频率 1~25 MHz)的反射主要发生在 F_2 层上,反射高度在 200~600 km 之间变化。

太阳活动能引起电离层激烈扰动。当快速太阳风粒子沿着开放磁力线进入地球极区拐点(polar cusp)时,极冠吸收(PCA)发生,这被 1~50 MHz 电波的强烈吸收所证实。PCA 开始于太阳大耀斑发生后几小时内,最大值出现在触发后的 1 或 2 天。Zmuda 和 Potemar(1972)研究了 D 层在太阳宇宙线轰击下对 PCA 的影响以及伴随 VHF, HF 和 VLF 电波传播扰动。在偏离于极区(也包括极区)与太阳活动事件有关的短波信号衰减增加称作突发性电离层扰动(SID)或称 Mogel-Dellinger 效应。SID 持续时间从几分钟到大约 1 小时,它是 D 层电离增加所致。与短波相反,来自于闪电辐射的低频和甚低频(LF, VLF)电波传播却被加强。

与太阳耀斑有关的在 X 射线, EUV 和 UV 辐射范围内的短波电磁辐射在地球的日照一面引起电离层电导率增加和正常电离层电流的变化, 从而对地磁场产生了一个显著影响。地磁场大约有 ± 50 nT 变化(称作“太阳耀斑效应”)。水平磁场 H 变化大约持续 30 分钟(或以下)。这种效应正好证实了电离层条件和地磁学在物理上是如何联合的。

在第五次国际大气电学会议上 Bostrom 和 Fahleson(1974)报告测量了电离层中电场。Park 和 Dejnakintra(1977)指出极冠区磁层对流对电场的影响。Ogawa 等(1974, 1975, 1982)报告了三维电场结构和平流层中水平电场, 并测量了磁扰动时期平流层中的水平电场。此后, Matsuhita(1982)报告了被太阳变化产生的高层大气中的电流和电位。所有上述研究都是利用气球, 高度在 25~29 km 处。Ogawa 等(1981), 利用火箭测量了南极光带的交流(AC)和直流(DC)电场。Kasemir(1981)和 Ruhnke(1984)模拟了极光电流。Takasi 和 Kanji(1985)根据气球测量资料研究和模式计算了脉动极光带电离层下的电场扰动。Reid(1986)综合评述了中层大气的电结构和高层大气电场源, 此类研究很多, 不再多述。

2.2.2 地磁场扰动

许多年来, 在太阳—地球研究中一直应用地磁场长时期显著性扰动, 这是因为它们和可变的太阳活动性之间有确定范围的联结。当然, 上述的研究是必要的, 但是太阳事件和地磁反应之间的有关耦合的缺点也是存在的, 且必须指出, 这里仅简单概括一些最重要的考虑。

在局地地磁坐标系统中地磁场矢量表示为 $\vec{B}$, 还有两个角度 I 和 D 。 I 为磁倾角, 是 $\vec{B}$ 和水平磁场 H 之间的夹角, 向下为正。 D 为磁偏角, 是水平分量 H 的方位角(以正北为 0 度)。 Z 是地磁场垂直分量。地磁场值随地理位置变化强烈。与太阳活动有关的仅是与各种时间尺度有关的扰动, 它们用磁静指数来表示。最常用的是 Kp 指数(对于行星际空间为 P), 是每天 3 小时间隔内 H , D 和 Z 的偏离值。近代利用了另一指数 A_p , 是从 1 天内 Kp 指数之和引申出来的一个线性指数。磁静日是指地磁场所有分量呈现平滑和规则的变化。在磁静日太阳的磁变化称 S_g , 其量约 20 nT(太阳作用被忽略)。 S_g 电流被流入赤道上空一个狭窄区内的电急流加强。强烈的 S_g 电流流入赤道和中纬度之间日照一面, 等效电流在 100 km 高度附近。地磁活动偶尔也有 27 天周期(以及其他周期)。这是因为在辐射太阳等离子体(太阳风)的活动区以高速流形式造成地磁扰动。这里一个更重要的现象是磁暴, 水平分量 H 有很大的减小, 约 100~300 nT。表征一个磁暴的图示用典型特点的时间序列来描述: 突发性的磁暴开始(SSC, 持续时间 100~300 s), 初始位相(IP, 30 分到几小时), 主位相(MP, 几小时或几天)和恢复位相(RP)。磁暴开始在所有纬度 H 分量尖锐增加, 在赤道地区由于电急流有一些特殊扰动叠加, 地磁场的“太阳耀斑效应”也必须被注意。耀斑期间, 活动区的短波辐射被加强。它们引起电离层电导率增加和在地球的日照一面瞬间地改变正常电离层 S_g 电流, 对于地磁场的反应是水平分量 H 有一个约 50 nT 的脉动变化, 持续时间约 20 分钟。这种太阳耀斑效应与磁暴相比是次要的。这些通常是被到达磁层附近伴随有冲击源的高速太阳等离子体所引起。地磁暴也伴随有引起电波通信中断的电离层扰动。

如上所述, 地磁扰动可直接用于度量太阳活动和特殊太阳事件而没有其他限制。但事实并非如此, 因地磁场在太阳静日的偏离是太阳输入出现的许多变化中的一个次级反应。即使反应限制在地磁暴主位相日期时, 与其他主要的太阳现象之间的关系或是不存在或仅是模糊

的。Reiter(1979)研究了 1969—1977 年期间太阳活动和地磁扰动的时间序列叠加变化,以显著地磁暴爆发日作为关键日。太阳活动特征是采用太阳黑子数,钙谱斑指数和 2695 MHz 太阳射电能量。分析结果指出,磁暴与主短周期太阳事件之间的关系不显著,但与太阳风和太阳质子所引起的大气电离的次级过程有联系。银河宇宙线强度的降落和电离层扰动是主要的(即是一级和二级效应),地磁响应是三级现象。据此,地磁现象无法用来表示特殊的短周期太阳事件的度量,或者仅是一种弱表示。对于长周期太阳—地球关系研究,地磁扰动的特征可以被利用但具有一个明确的限制(Legrand 和 Simon,1989)。当然,地磁活动受 11 年太阳黑子周期影响。但是,地磁活动年平均分布指出,其极大值并不与太阳黑子数极大值一致。地磁指数倾向有双峰现象,其主峰值位相与黑子周期峰值位相有偏离(Gosling 等 1977),这种双峰现象在许多大地磁暴中被观测到(见 Gorney,1990)。1900 年以来,每个太阳黑子周期内地磁活动的最小值呈现显著的增加。上述研究指出,地磁场参量在日地关系研究中可以被应用,但具有一定的限制性。

2.2.3 大气电参量扰动

电离层特性和地球磁场对于太阳活动的响应是直接的,有较显著的对应关系。但是,太阳活动和中层大气及对流层中的一些过程之间的联结是间接的,也没有肯定的对应关系,它们之间可能通过某些其他过程建立联系。例如,太阳活动是否通过对大气电过程的调制来影响天气气候,本节着重介绍大气电参量的响应扰动。

早在 1913 年,大气电学先驱者之一 Alfred 曾讨论了太阳活动对大气电参量的可能影响,认为影响可能存在但持怀疑观点。Bauer(1924)首先提出了大气电位梯度与太阳黑子数之间的相关性,根据 1902—1922 年期间五个地面电场观测站资料统计分析指出,地面电场强度随太阳黑子数增加而增大,二者存在相关性但无显著性逼近。此后,Gish(1936)利用自由气球测量 22 km 高度以下电导率,发现也受太阳活动影响。但在 20 世纪上半期,更多学者持反对观点,认为高度导电的电离层类似于一个法拉第网对平流层大气起了屏蔽作用,从而阻止了来自上层的电过程。

20 世纪下半期,人们开始从两个方面来讨论大气电参量对于太阳活动的响应:首先是大气电参量对于短时期太阳事件(例如耀斑,太阳质子事件等)的响应。讨论此类相关性通常用时序叠加分析法,中心零日为太阳事件发生日。然后对长时期观测的太阳事件予以时序叠加。另一个方面是大气电参量或气候参数与太阳活动参量(太阳黑子数,10.7 cm 射电通量,地磁活动指数等)之间的长时期相关性研究。此后,越来越多的观测和统计研究指出,各种太阳活动和大气参量之间有很好的对应关系,且全球雷暴频数和太阳活动也明显相关(Markson, 1971,1978,1980)。

2.2.3.1 大气电离化率

众所周知,银河宇宙线是中低层大气的主要电离源。因此,大气电离化率随太阳活动的变化应该和银河宇宙线有相同的变化趋势。大气电离化率与 11 年太阳黑子周期呈现反相关。

图 2.1 是 20 km 高度处大气电离化率与地磁纬度、太阳活动的关系(Hake,1973)。从图可见,在太阳活动低年,电离化率比高年要高呈长时期反相关,在低纬度约高出 40%(相应电导率高出 23%),而高纬度为 70%(相应电导率高出 45%),其纬度效应是明显的。原因是进

入低纬地区的宇宙线粒子的能量比高纬度区域大,所以受太阳活动影响较小。电离化率的变化是由于太阳活动改变了行星际磁场和地磁场,从而对进入大气的宇宙线粒子进行调制的结果。除了太阳黑子活动影响外,来自太阳 M 区的太阳风以及太阳磁扇面扫过地球时,地磁场都能发生变化甚至引起磁暴。因此,也影响大气电离化率的变化(Neher,1971),呈现 27 天周期性。

强烈的太阳活动(例如耀斑爆发)所喷射的高能质子流是影响高层大气电离化率变化的主要能源。质子流的能量远小于宇宙线能量,故在地磁场的作用下,只能进入高纬度地区,存在一个截止磁纬度约 50° 。质子流不能进入小于截止磁纬区,也不能深入低层大气,影响高度在 20~25 km 以上。太阳质子流所产生的电离化率远比宇宙线所致电离化率高,约为 $10 \sim 10^6$ 对/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)。

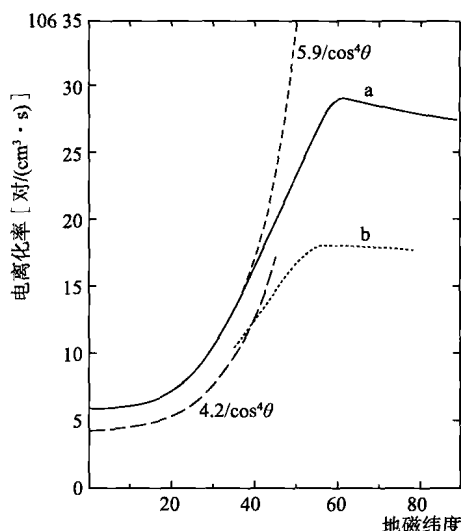


图 2.1 大气电离化率随太阳活动,磁纬变化

a. 太阳活动低年(1965); b. 高年(1958)

2.2.3.2 大气电场,气—地电流变化

Bauer(1926)根据英、法几个地面测站 20 年电场资料研究太阳黑子周期与地面大气电场的关系,发现在太阳黑子峰值年,电场的一年平均值比 20 年的平均值要高(约高 $\pm 10\%$),而在谷年却要低(约低 $5\% \sim 10\%$),电场和太阳黑子有很低相似的 11 年周期变化曲线,呈现明显长时期正相关。近年有更多的观测分析工作研究太阳黑子周期对大气电场的效应。有人发现这种相关性不确定。

气—地电流和黑子周期呈明显的长时期反相关。Olson 在 Lake Superior 上空测量从 1966—1982 年的气—地电流密度和相应的太阳黑子数(Olson,1982),发现反相关很明显,最大差别达 50% 。所以,从长期变化来看,大气电场和太阳黑子数呈不确定的相关,气—地电流和太阳黑子呈反相关。因为全球晴天气—地电流来源于全球雷暴的充电作用,而雷暴所提供的充电电流大小,除了取决于雷暴本身结构特点外,还与雷暴顶以上大气电导率大小有关,在长周期关系中,影响该电导率的主要因素来自银河系的宇宙线强度。而宇宙线强度和太阳黑子成反相关,故在太阳黑子极大年时,雷暴上空电导率减小,于是雷暴向上提供的充电电流也

减小。在全球电路中,此充电电流流经电离层在晴天区域通过大气层入地,构成气—地电流。所以气—地电流和太阳黑子呈反相关。从太阳黑子极大年到极小年,气—地电流平均最大增加约 50%。而电导率平均增加 22%,所以从 $j = \sigma E$ 公式考虑,电场也应该是增加的,即大气电场和太阳黑子周期也应该有反相关关系,但实际观测指出是不肯定的正相关性(即电场是减小的)。我们考虑可能是太阳黑子活动改变了电离层高度的缘故(太阳黑子数从极大到极小,电离层高度升高),所以使晴天电场减小,呈正相关。但太阳活动对电离层高度的影响不明显。所以这种正相关性不是很确定。由于宇宙线强度有纬度效应,所以大气电场和气—地电流也有相同的纬度效应,随纬度增加而增大。

就短周期而言,太阳耀斑爆发和近地面大气电场、气—地电流有明显的正相关性。Cobb (1967)从 1960 年 9 月在夏威夷山区站对气—地电流连续观测了一年,这一年内共发生 ≥ 3 级耀斑约 28 次,且发生了 42 次磁暴,统计平均指出,在伴随一次耀斑爆发之后,气—地电流平均增加 11.7%,且这种增加有 80%的情况是发生在耀斑爆发后 1 天之内。此后,Reiter (1971)在德国 Zugspitze 山区(海拔 2964 m)连续进行了 20 年观测(1949—1969),发现从耀斑出现后 1~4 天内,电场和气—地电流一直是增加的,平均增长百分比为 50%~60%。Reiter 分析了 1967.12—1969.5 在太阳中心子午线附近(约 20°W—20°E 内)爆发的 H_e 太阳耀斑后所伴随的电场 E 和气—地电流 i 的变化百分比,测站是 Zugspitze 山区,结果指出,耀斑爆发后, E 和 i 有 2~3 天的增加,经过数天后才慢慢恢复到原来的值。此后,Sartor(1980),Takagi 和 Iwata (1984)等在不同地区测量耀斑后的电场变化都有类似结果。上述正相关性是由于耀斑爆发所产生的质子流增大了 25 km 以上大气电导率,增大了雷暴向上提供的充电电流,即增大了 j ,也就增大了电离层电位,同时又减小了低层大气的电导率 α ,所以 $j > \sigma E$,使 E 增大很多。但对于 > 15 km 高层,耀斑引起 σ 增大,反而使 E 减小。

太阳磁扇面边界扫过地球时,电场和气—地电流也有相应变化。Park (1976)和 Reiter (1977)测量了太阳磁扇面边界扫过地球时的地面电场 E 和电流 i ,测量时间是 1974 年 3—11 月,共有 17 次扫过资料,发现在扫过 1~3 天内电场平均减少了约 15%,且对于磁扇面边界从接近到离开或从离开到接近电场变化差不多。

2.2.3.3 电离层电位变化

电离层电位和太阳黑子数具有长周期反相关关系,和气—地电流的相应变化相同。Muhleisen (1971),在太阳黑子极大年测量到电离电位为 250 kV,而极小年时为 350 kV。从极小年到极大年,电离层电位平均减少了约 30%。

电离层电位和太阳耀斑爆发呈正相关,在耀斑爆发后 1 天到数天内,电离层电位增大。这是由于太阳质子流增大了雷暴顶上空大气电导率。

在地磁场调制下,能够进入地球大气的太阳质子流存在一个截止纬度 φ_0 ,在大于 φ_0 的区域,太阳质子流能深入大气层(约在 25 km 以上),增强大气电导率,使等电导率面(或等电位面)高度降低。因此,从全球而言,原来水平的等电位面在 φ_0 处发生弯曲(在约 25 km 以上区域),从 φ_0 向北极方向等位面较低, φ_0 向赤道方向等位面较高,在 φ_0 处的弯曲约跨 1°磁纬度(Engelmann,1971),在这 1°区域内,电力线特别稠密。电场增大很多,在大于 φ_0 的高纬度区域,由于电离层高度降低使大气电场强度增大,在 25 km 以上电场强度可增大百分之几到几十(Imhof,1971)。