

# Advances

in Meteorological Science and Technology

# 气象科技进展

# 04

2011年12月  
第1卷 第4期

## 空间天气 专辑



气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T

ISSN 2095-1973



9 772095 197118

中国气象局气象干部培训学院 主办

**主管** 中国气象局

**主办** 中国气象局气象干部培训学院

**名誉主编** 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院

**主编** 许小峰 中国气象局

**副主编**

肖子牛 中国气象局气象干部培训学院  
翟盘茂 中国气象科学研究院  
罗云峰 中国气象局  
王会军 中国科学院大气物理研究所  
李维京 国家气候中心  
胡永云 北京大学  
谈哲敏 南京大学  
费建芳 解放军理工大学  
管兆勇 南京信息工程大学  
周定文 成都信息工程学院  
黄建平 兰州大学  
廖小军 国家遥感中心  
吕世华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所  
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

**常务编委** (按音序排名)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭学良	李 柏
李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉	任小波
沈文海	王卫丹	武炳义	杨修群	俞小鼎
张朝林	张 鹏	张庆云	赵 平	

**编委** (按音序排名)

毕宝贵	陈云峰	陈振林	崔春光	崔讲学
董文杰	封国林	郭 虎	何金海	何 清
胡 欣	胡玉蓉	胡跃文	姜 彤	雷小途
李 慧	李集明	李良福	李耀辉	李跃清
梁旭东	刘晶森	刘黎平	刘 实	卢乃锰
陆日宇	罗 兵	罗亚丽	马 力	马舒庆
马耀明	毛恒青	彭莹辉	浦一芬	石广玉
宋 燕	汤 绪	田 红	万齐林	王 斌
王东海	王建林	王晓云	王延青	王迎春
王 元	王在志	王自发	温 敏	文洪涛
吴立广	谢志辉	闫冠华	杨昭明	姚学祥
伊 兰	翟武全	张 华	张立祥	张小玲
张跃堂	赵广忠	周凌晔	周显信	朱定真
朱小祥	祝燕德	邹立尧		

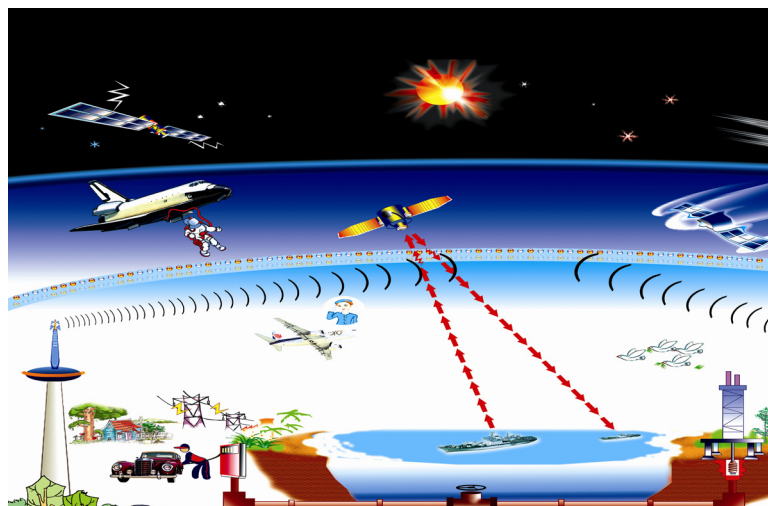
**海外编委** (按音序排名)

陈镜明	李 俊	刘征宇	金飞飞	王 斌
翁富中	杨 崧	张大林	张广俊	邹晓蕾

**编辑部** 张 萌 侯美亭 胡 英 苏士坡  
陈忠美

出版: 《气象科技进展》编辑部  
地址: 北京市中关村南大街46号,  
中国气象局气象干部培训学院 100081  
电话: (010) 68409927/68409933  
邮箱: amst@cma.gov.cn  
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA  
网址: <http://library.cma.gov.cn/amst>  
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>  
印刷: 北京宝昌彩色印刷有限公司

国际标准刊号: ISSN 2095—1973  
国内统一刊号: CN 10—1000/P  
定价: 20元



本刊已被教育阅读网、《中国学术期刊网络出版总库》及CNKI系列数据库收录。

## 目 次

第1卷 第4期 2011年12月

(空间天气 专辑)

### 研究论文

#### 封面报道

#### 6 王劲松: 中国气象局的空間天气业务

“空间天气”概念的缘起与演变表明,空间天气业务必然会出现,且与其他气象业务存在天然的联系……

#### 研究进展

- 13 呼延奇等: 空间天气事件对航天器的影响
- 18 郭建广等: 国际上的空间天气计划与活动
- 26 吕建永等: 空间天气研究进展
- 37 赵 亮等: 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展

#### 专题

- 49 胡 英等: 空间天气领域文献计量指标分析

## 主编语

2011年岁末，我国航天工程获得突破性进展，“天宫”和“神八”在地球空间轨道上的遨游、对接，将人们的视野再次拉伸到遥远星空。而在这些航天器准备升空和降落的过程中，发射场风力预报、窗口发射期和空间天气预报等概念，让很多航天“粉丝”们知晓了航天发射不仅要有地面发射场适应“窗口”时间的精准天气预报，还需要通过对外层空间天气是否适宜发射的预测判断，才能保障航天器在发射阶段和在空间运行时的安全。

“空间天气”是个年轻的概念，这一词汇出现于上个世纪70年代，在含义上与近地面大气层中表现出的万千气象完全不同，涉及到的学科也有较大差别，但也是地球科学中一个多学科交叉领域，涉及到物理学、天文学、地磁学、太阳物理、日地物理、高层大气物理等多个学科。

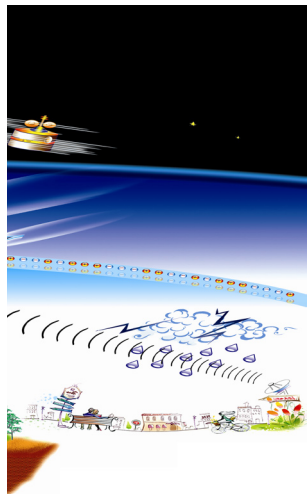
空间天气不仅对于航天活动十分重要，自1835年摩尔斯电码的发明开启了电子通信系统的大门以后，各种电子通信设施和运行常会遭遇到空间天气的干扰。此外，电力传输网、石油管线等也都一直受到空间天气的影响。

1859年，曾发生了历史上有记载的最严重的一次太阳风暴。英国天文学家理查德·卡灵顿(Richard Carrington)最先发现这一现象，这次太阳风暴就被

称之为“卡灵顿事件”。英国格林尼治天文台测量到了地磁场强度的剧烈变动，地磁仪的指针因超强的地磁强度而跳出了刻度范围。由于当时的科技应用水平较低，仅是电报通信业务受到了一定影响。若是在电子、电力、通信、卫星等先进技术得到广泛应用的今天遇到这种空间天气事件，其后果影响不堪估量。

为了让读者全面了解空间天气领域的进展和应用，本期为空间天气专辑。刊中论文分别介绍了中国气象局的空间天气业务、太阳活动对气候变化及航天器的影响、国际上空间天气的有关计划与活动和太阳活动的基本特征等最新研究进展。“论坛”栏目还特别刊登了魏奉思院士的专题文章，对空间天气的影响、发展、国内外发展现状、我国空间天气业务和科研发展战略及所面临的挑战做了一一介绍。关于空间天气学文献计量的分析文章，还能让我们从整体上把握该领域在学术上的现状和发展动态。

本期作为本刊第一卷的收尾，首次尝试就一个主题推出专辑，这一试验性的做法，得到了本期特约编辑王劲松研究员的大力支持，特表谢意。今后，我们还会结合学科发展情况策划和推出其他专辑，希望更多的专家和读者提出建议，并能参与其中，使我们的期刊具有更鲜明的特点和更强的可读性。



P6

封面报道：中国气象局的  
空间天气业务

封面图：空间天气对人类的  
影响

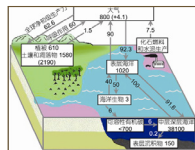
## 论坛

53 魏奉思：关于我国空间天气保障能力发展战略的一些思考

57 王华宁等：太阳活动的缓变与瞬变特征

## 科学观察

2 读图 数字 榜单

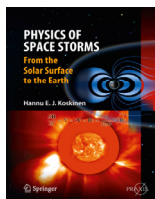


P2

## 阅读

### 书评

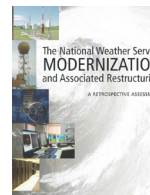
64 李伟光等：《空间风暴物理学：从太阳表面到地球》评介



P64

## 信息

- 25 下期要目
- 48 新书架
- 62 文摘（中文文献）
- 63 文摘（英文文献）
- 封3 媒体扫描



封3

## 往事钩沉

### 人物/事件

60 贾朋群：空间天气发展时间简表 P60

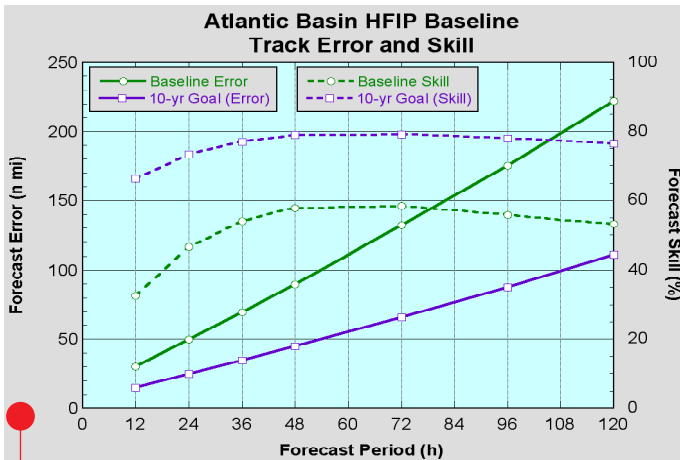




### 美国NPP项目：新的极轨环境卫星升空

2011年10月28日，美国最新的极地轨道地球观测卫星升空，这颗属于NPP（NPOESS Preparatory Project，NPOESS预备项目）的卫星，位于地面以上512英里，每102分钟环绕地球一圈，对大气状况进行监测。其数据将在大约90天后开始提供，届时将替代NOAA-19卫星。

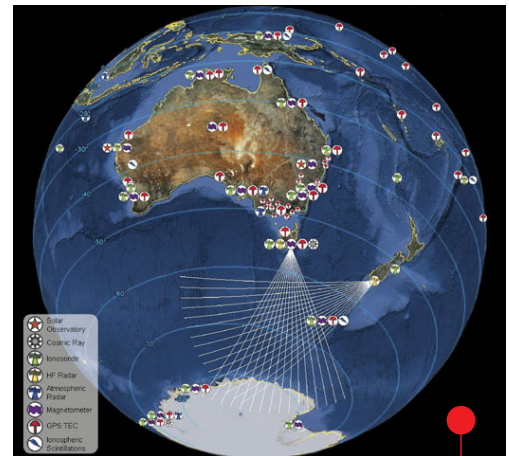
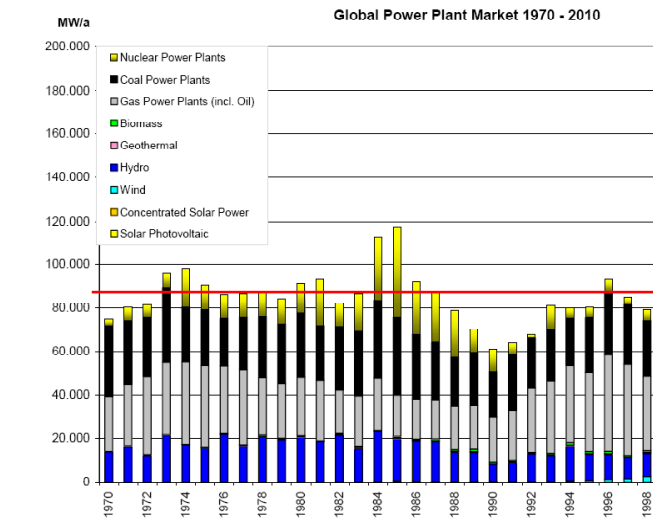
来源：NOAA



### 飓风预报改进项目：用10年大幅度提高准确度

飓风的精确预报不仅能够减轻其危害，还能让减灾防灾工作更有针对性，减少对非影响区域的干扰。为此，NOAA实施的飓风预报改进项目（HFIP）计划10年内大幅度提高飓风预报的准确性。

来源：NOAA



### 澳大利亚空间天气观测网

目前，澳大利亚已经建成了较为完善的覆盖本土及周边区域的空间天气网。观测网包括高频（HF）和GPS站，以及分别位于塔斯马尼亚和新西兰的TIGER项目（the Tasman International Geospace Environment Radars，塔斯曼国际地球空间环境雷达）天线波束（图中白色线）等。

来源：澳大利亚气象局

## 数字

**2700** 平方千米

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的一项研究表明，近30年，黄河源区沙漠化面积增加了2744.97平方千米，沙漠化面积占源区的比例从30年前的14.68%增加到16.77%。

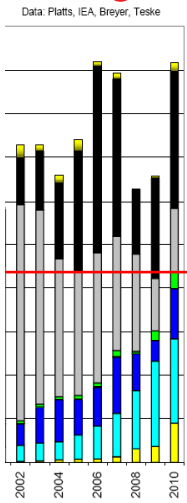
**2485** 年

青藏高原中东部温度2068年将降到谷底，这是中科院地球环境研究所研究员刘禹及其团队根据树木年轮资料，重建了青藏高原中东部过去2485年的温度变化后得到的预测结果，相关成果发表在《科学通报》杂志上。

**10** 亿英镑

英国能源和气候变化局制定了10亿英镑的投资计划，用于捕捉和掩埋位于苏格兰的一家燃煤电厂每年产生的几百万吨二氧化碳。

### 绿色和平组织：全球电力市场分析



最近，绿色和平组织在一份报告中，给出了全球1970—2010年电力市场的分布。分布图清晰地显示了全球电力市场起伏性不断增强的特征以及新世纪以来以风能为代表的绿色能源对电力需求增加和平抑化石能源所起的作用。

来源：绿色和平组织



### 加拿大臭氧观测网：恐难维持

今年北极大气臭氧含量又创新低，然而监视北极地区臭氧最重要的观测网——加拿大北极臭氧观测网很可能被削减。加拿大环境部近日决定大幅度削减其臭氧研究和观测项目。目前，包括17个站的加拿大臭氧观测网占整个北极臭氧观测的三分之一，开始观测时间要追溯到1966年。

来源：Nature

### 国际“空间天气”主题被引频次最高前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引次数
1	Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer	McComas, D J	Space Science Reviews, 1998,86(1-4)	499
2	The ACE magnetic fields experiment	Smith, C W	Space Science Reviews, 1998,86(1-4)	458
3	The Advanced Composition Explorer	Stone, E C	Space Science Reviews, 1998,86(1-4)	285
4	Ionospheric storms - A review	Buonsanto, M J	Space Science Reviews, 1999,88(3-4)	251
5	Magnetopause location under extreme solar wind conditions	Shue, J H	Journal of Geophysical Research-Space Physics, 1998,103(A8)	241
6	Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI)	Howard, R A	Space Science Reviews, 2008,136(1-4)	238
7	The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool	Tobiska, W K	Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2000,62(14)	216
8	Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates	Arge, C N	Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2000,105(A5)	197
9	A flexible, IMF dependent model of high-latitude electric potentials having "space weather" applications	Weimer, D R	Geophysical Research Letters, 1996,23(18)	192
10	Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms	Webb, D F	Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2000,105(A4)	186

来源：SCIE数据库，检索时间：2011年10月25日

胡英提供

20445↑

未来几年，我国将投资17亿元，由国土资源部、水利部联合，建成包括20445个监测站点的全国性地下水监测网，其中包括新建和修复国家级地下水监测点10103个，全面提升区域地下监控能力、预报预警能力、决策支持能力与信息服务能力，推动地质环境监测体系建设，实现地下水监测信息及时获取与应用分析，为各级政府管理部门和社会公众提供优质服务。

27颗

欧洲空间局10月21日发射了欧洲全球定位系统——伽利略系统的前两颗业务卫星，与在轨的两颗试验卫星会合。伽利略系统投入50亿欧元，由27颗业务卫星和3颗备份星组成。

0.6吨

英国剑桥大学和英国生态与水文中心的一项研究发现，虽然气候变暖会加快植物，特别是热带雨林的生长速度，但枯落物也会随之增加，刺激土壤微生物释放出更多二氧化碳。研究人员估计，凋落物每增加30%，每公顷土壤释放的二氧化碳会增加0.6吨。





# 中国气象局的空間天气业务

王劲松

(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** “空间天气”概念的缘起与演变表明, 空间天气业务必然会出现, 且与其他气象业务存在天然的联系。作为中国气象事业的有机组成部分, 中国气象局的空間天气业务在监测、预报、服务和科研开发等方面取得了显著的成绩。分析表明, 空间天气业务要取得突破性进展, 应首先在应用服务方面着力。

**关键词:** 空间天气, 空间天气业务

## Space Weather Operations in CMA

Wang Jingsong

(National Satellite Meteorological Center /National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The appearance and evolution of the term 'Space Weather' suggest the inevitability of the initiation of space weather operation and the natural connections between space weather operation and other meteorological operations. As an essential part of the Chinese meteorological operation system, the CMA space weather operation is achieving significant successes in observation, forecast, service as well as R & D. Nevertheless, space weather operation is still far from maturity and the possible breakthrough should be made in productive services.

**Key words:** space weather, space weather operation

### 1 “空间天气”的出现

在“空间天气”一词出现以前, 研究太阳与地球之间的空间中(包括太阳表面、太阳风、磁层、电离层和热层等)自然现象及其内在规律的学科叫做“日地空间物理学”<sup>[1, 2]</sup>, 或称“空间物理学”(图1)。

据文献记载<sup>[3]</sup>, 类似“空间天气”的说法应该是始于1959年哈佛学院天文台的Gold的一篇文章: “我将讨论……(太空中)和地球气象对应的概念, ……,(在太空中)什么参量和气象中的温度、压强和风速对应”<sup>[4]</sup>。1967年, Georges<sup>[5]</sup>在一篇报告里首次完整使用“space weather”一词: “电离层最近作为其他地球物理活动的传感器而变得重要起来, 例如

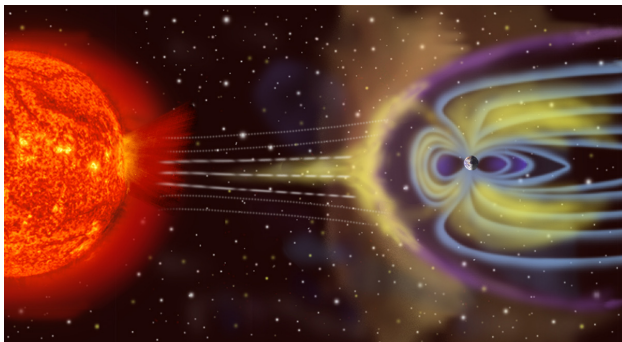


图1 日地空间: 太阳上喷发的物质和能量经过行星际空间后和地球的磁场相互作用, 并进一步扰动地球的高层大气、电离层等<sup>[2]</sup>

作为‘空间天气’指示器……”。而使这一概念得到更多同行认可的是美国国家大气海洋局(NOAA)空间环境中心的McIntosh和Dryer博士, 他们1970年在一本书的序言中写道: “确实很必要去精确预报空间‘天气’”<sup>[6]</sup>。

这些提法只是从科学上将日地空间中的自然现象和地球低层大气上的自然现象进行类比(表1), 虽然有助于科学家采用比较研究法研究日地空间, 也有助于大众理解一些艰深的科学概念, 但并不产生新的外延和内涵, 因此没有成为学界普遍使用的术语。

就在同一时期, 由于人类航天事业的发展, 科技人员注意到进入太空的航天器会受到其所处环境的影响, 这种环境被称为“空间环境”, 该术语被广泛使用<sup>[7]</sup>。需要注意的是, 空间环境虽然受到日地空间中自然过程的影响, 但它更加注重与在轨航天器的相互作用, 因此像空间碎片这样的非自然因素也是空间环境所关注的重要对象。

“空间天气”一词的密集出现并吸引学术界广泛关注是在20世纪90年代, 美国的科学家率先系统地向日地空间中发生的自然现象与人类技术系统(特别是卫星系统)的故障联系起来, 并借用“天气”对人类活动的影响来说明日地空间状态对技术的影响。与“空间环境”主要关注航天系统不同, “空间天气”关注所有可能受到日地空间自然过程影响的技术系统<sup>[8, 9]</sup>, 目前可以肯定的受影响的系统或领域包括在轨航天器与

收稿日期: 2011年9月7日; 修回日期: 2011年10月27日  
第一作者: 王劲松(1970—), Email: wangjs@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金(40931056)

表1 空间天气与传统气象概念的类比

区域	对象	气象类比	业务监测仪器	业务重要性
太阳	冕洞	高压	X-EUV射线成像仪	★★★★
	CME	台风	日冕仪	★★★★★
	黑子	强对流区	光球色球望远镜	★★★★
	耀斑	雷电	光球色球望远镜	★★★★★
	射电流量	红外辐射	太阳射电望远镜	★★★
	太阳磁场	—	太阳磁场望远镜	★★★★
行星际/日地空间	行星际磁场	温度	磁强计	★★★★★
	太阳风	风	粒子探测器	★★★
磁层(地磁)	空间磁场	气温	磁强计	★★★★
	辐射带	—	粒子探测器	★★★★
	能量粒子	冰雹	粒子探测器	★★★★
	地磁场	地温	地磁仪	★★★★★
电离层	极光	闪电	极光相机	★★★
	电子浓度	大气密度	测高仪	★★★★★
	TEC	水汽柱含量	GPS	★★★★
	TEC	水汽柱含量	电离层光度计	★★★★
	闪烁	云	闪烁监测仪	★★★★
中高层大气(临近空间)	密度	密度	激光雷达, 卫星	★★★★
	温度	温度	FPI	★★★
	温度	温度	流星雷达	★★★★
	成分	成分	质谱仪	★★
	风场	风场	中频雷达, FPI	★★★★

宇航员、航空、无线电通信、长距离输油与输电网络、天气与气候、生物等<sup>[10]</sup> (图2)。

有一些学者对这种新的提法不以为然。他们认为, 由于在冷战期间美国在空间物理上的投入过多, 研究机构和人员过度膨胀。而冷战结束后这方面的投入迅速减少, 许多从事空间物理学研究的科学家失去经费支持。“空间天气”这一概念强调空间物理和现代技术的关联, 无非是为了获得政府的继续支持, 而本质上与“日地空间物理”没有差别。这种看法的影响迄今还偶有体现。

我国学界不久也开始使用“空间天气”这一概



图2 空间天气对人类的影响

念。尽管也存在一些质疑的声音, 但这种新的提法还是迅速得到多个部门特别是国家自然科学基金委员会的认可<sup>[11]</sup>, 我国的空间天气研究开始迅速发展, 无论是资金投入、队伍规模还是科研成果都显著增加。而且, 我国学者还在国际上首次提出并使用一个新的学科名称——“空间天气学”<sup>[12-14]</sup>, 该名词在英文中还没有确切对应, 大致可以翻译为“Space Weather Science”。

事实上, 到目前为止国际学术界还没有“空间天气”的严格定义, 通常都引用美国“国家空间天气战略计划”的说法, 指“太阳上和太阳风、磁层、电离层和热层中可影响地基和地基技术系统的正常运行和可靠性, 危及人类健康和生命的条件或状态”<sup>[15]</sup>。从这种提法可以清楚地看出, “空间天气”这一概念不再像它刚出现时那样只是与地面天气的简单类比, 而是更加注重自然环境和人类活动的相互关系, 其内涵与外延已大大超出以往的“日地空间物理(学)”。因此关注空间天气的群体不再仅仅是以前的空间物理学家, 而是开始不断扩大, 航天、航空、通信、能源、军事等应用行业的科技人员开始关注空间天气。特别是1989年3月太阳爆发引发的魁北克大停电, 使地球居民真实地感受到“空间天气”的存在, 从此普通公众与科技人员一起像接受“天气”概念一样接受“空间天气”概念, 最终导致空间天气业务的出现<sup>[16]</sup>。

## 2 空间天气业务历程

空间天气业务是指与空间天气有关的业务技术活动, 包括空间天气监测、预警预报、应用服务、研发以及相关的基础设施建设等<sup>[16]</sup> (图3)。由于日地空间(从太阳外层大气到地球中高层大气)是传统气象关注的地球低层大气在空间上的自然延伸, 空间天气业务与传统天气和气候业务一起成为气象业务的一部分也就是很自然的事情了。

人类对空间天气现象的关注始于对太阳黑子、耀斑、极光等的目视观测, 在现代科学意义上系统的空间天气活动可以从二战前后雷达与短波通信的预报和保障算起, 1940年代美国国家标准局专门成立了为盟军提供高频电波服务的“军种间电波传播实验室”。1957年人类发射第一颗人造卫星之后, 更加系统的工作随之展开。前苏联、美国、中国等均开始关注太阳对人造卫星的影响, 涉及的自然现象包括太阳活动、宇宙线、高层大气与电离层状态等。

1965年, 美国的“军种间电波传播实验室”经历数次变化后成为“空间环境实验室(SEL)”, SEL于1995年又更名为“空间环境中心(SEC)”, 成

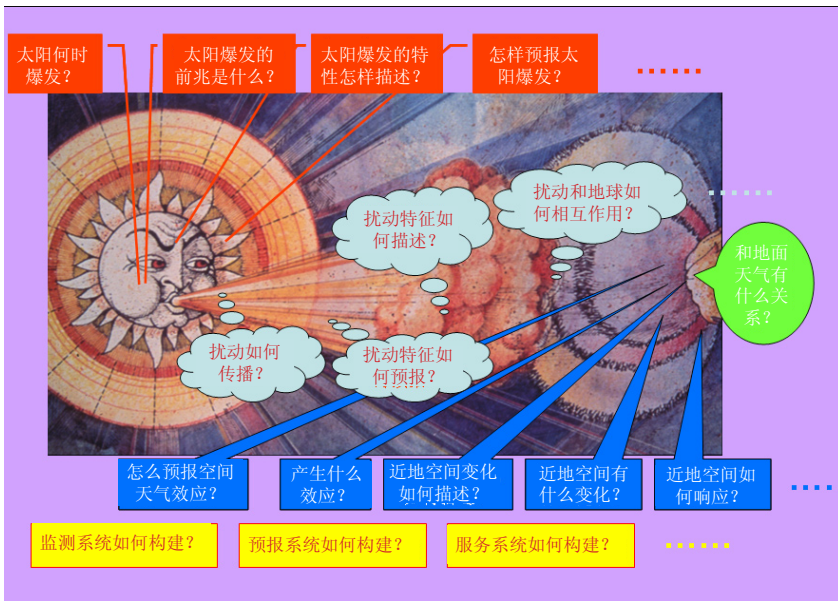


图3 空间天气业务涉及的主要问题

为NOAA海洋与大气研究办公室（OAR）下属的一个有浓厚业务色彩的研究单位。虽然NOAA的GOES、POSE系列卫星均是空间环境最基本的数据源，但SEC本身并不开展监测工作，因此它的主要任务侧重于空间环境预报及其研究，其运行模式成为其他国家有关单位模仿的范本<sup>[17]</sup>。1996年，在国际科联的支持下，在一个始于1928年的国际组织的基础上，以NOAA/SEC等为核心成立了一个准业务性的国际科学合作机构——国际空间环境服务机构（ISES），其宗旨是“鼓励并实施近实时的国际空间环境监测和预报，帮助用户降低空间天气对人类活动的冲击”。其成员是13个区域预警中心（RWC），其中北京RWC设在中国科学院国家天文台（<http://www.ises-spaceweather.org>）。

国家天文台最早在我国开展具有带有业务性质的太阳监测和预报工作，其最早的服务目标是“东方红一号”卫星；成立于1963年的中国电波传播研究所则在电离层监测和预报方面形成了系统的能力，主要服务于短波通信等信息系统。以中国科学院空间科学与应用研究中心的空间环境室为载体，2003年中国科学院成立了一个非法人联合机构——中国科学院空间环境预报研究中心，系统开展空间环境和空间天气预报研究，并承担一些重大航天活动的保障任务<sup>[14]</sup>。

有意思的是，第一个真正将“空间天气”列入业务系列的不是NOAA，而是中国气象局。经国务院批准，2002年中国气象局成立“国家空间天气监测预警中心”，并于2004年开始正式开展国家级业务工作。其预报框架主要参照了NOAA/SEC的架构（也即目前SWPC架构），但其总体的业务体系设计

以及监测、服务和科技创新等分系统的构建则更多地借鉴了中国气象局其他气象业务的经验。三年后的2005年，NOAA才将SEC从研究系列的OAR中划转到业务系列的国家天气局（NWS）。同时，NOAA也意识到“空间天气”一词能够更全面地反映其关注的重点，并有利于在气象业务框架下的协调工作，遂于2007年将SEC更名为“空间天气预报中心（SWPC）”，同时对其内部结构进行了很大的调整<sup>[17]</sup>。值得注意的是，这次调整中似乎存在中国气象局与NOAA空间天气/空间环境业务交流的痕迹，例如NOAA成为国际上自中国气象局之后第二个成立空间天气

服务科的相关机构。

欧洲空间局于2000年成立空间天气工作组，2003年制定相关计划并启动一个综合的空间天气网站SWENET。但欧洲的空间天气事务主要采用商务形式，至今没有成立专门的空间天气业务机构<sup>[18]</sup>。

2008年6月，世界气象组织（WMO）通过了ISES提交的《世界气象组织在空间天气领域的潜在作用》报告，开始涉足空间天气事务，并于2010年5月3日正式成立空间天气计划协调组（ICTSW），以NOAA和中国气象局为联合主席单位，开始国际空间天气业务协调<sup>[19]</sup>。

从总体发展趋势来看，各国空间天气机构无论是否自主进行观测能力建设，都注重全方位、多要素综合、天地配合、立体的空间天气观测数据获取，并据此建立大型空间天气数据库，特别是具有在线数据发布能力的空间天气数据库及其共享服务系统，开发空间天气预报模式和加强空间天气效应分析。

但值得指出的是，由于前述的一些原因，空间天气业务并不是在公众对空间天气有了深刻认识的基础上产生的，特别是其应用基础并不十分扎实，因此其发展遇到了不少的困难。

### 3 我国空间天气业务现状

2004年，中国气象局正式开始国家级空间天气业务运行。空间天气业务体系按照气象业务体系结构进行设计，是一个相对独立而完整的体系，完整地包括监测、预报和服务等三个方面，并开展科研工作。其目的是构建天地一体化的空间天气监测系统、统计预报和数值预报相结合的空间天气预报系统、面向经济社会和国家安全的空间天气服务系统，同时也着力于

支撑空间天气业务的科技创新和人才队伍建设。初期该业务主要由国家空间天气监测预警中心承担，但随着地基基站的建设，不少省（直辖市、自治区）气象局也逐渐参与到空间天气业务中，并发挥越来越重要的作用。

迄今，中国气象局的空間天气业务在监测、预报和服务等方面发展比较平衡，在系列化的天基监测能力、网络化的地基监测台站、规范化的预报预警系统以及专业化的应用服务构架建设方面取得了良好的成绩，在国际和国内赢得了广泛的认同。

### 3.1 监测系统

从设计之初，中国气象局空间天气业务监测便以天地一体化为目标。鉴于监测系统建设的长期性，目前还没有达到天地一体化的程度，但基于风云系列卫星和地基空间天气专业监测网的天地相结合的监测格局雏形已经形成。

在天基监测方面，以风云系列卫星为核心，充分利用现有的风云卫星平台装载空间天气仪器，大力推进空间天气天基监测，在后续气象卫星规划中充分考虑了空间天气业务需求，并积极探索发展专门的空间天气业务监测卫星的可能性。目前在轨的六颗风云卫星上，装载有五类空间天气监测设备，共计16台仪器，所有监测已全部实现在线业务（表2）。在已经落实的规划中，除了完善和优化风云二号03批的空间天气载荷外，每个新型号的地面应用系统中将设计独立的空間天气应用分系统，一些新型的国际先进水准的空间天气探测仪器也在研制或考虑之中。

表2 风云卫星空间天气监测能力

卫星型号	搭载仪器
FY-1D	高能粒子探测器
FY-2C/D/E	太阳X射线探测器、高能粒子探测器
FY-3A/B	高能粒子探测器、辐射剂量仪、表面电位探测器、单粒子试验

在地基监测方面，以气象监测与灾害预警工程为

表3 空间天气地基监测能力

设备名称	探测要素	数量	站址	建成日期
电离层闪烁仪	电离层闪烁、电离层电子总密度（TEC）	4	广东广州	2010.4
			广东韶关	2010.4
			广东茂名	2010.7
			福建厦门	2010.7
电离层测高仪	电离层电子浓度剖面	5	福建厦门	2008
			广西横县	2011.5
			新疆克州	2010.12
			青海都兰	2010.12
			陕西长安	2011.12
电离层D区吸收机	电离层D区吸收	3	黑龙江漠河	2011.5
			海南屯昌	2011.6
			北京灵山	2011.7
中频雷达	中层大气风场、电子密度	1	山西五寨	2011.12（预计）
FPI成像干涉仪	高层大气风场、温度	1	山西岢岚	2011.12（预计）
太阳磁场望远镜	太阳磁场	1	新疆	2012.12（预计）
电离层移动应急系统	电离层闪烁、电离层电子浓度	1	北京（移动式）	2011.12（预计）
太阳射电望远镜	太阳射电流量	1	山东石岛	2011.8
太阳光球色球望远镜	太阳光球、色球	1	山东石岛	2010.12

基础，结合国内现有的地基探测站，在关键地点建设了太阳、电离层和高层大气观测台站，共计9类18台（套）设备，涉及14个省（自治区、直辖市），已初步显现出“三带六区”地基空间天气专业网布局。目前地基监测已全面稳步铺开（图4，表3），地基空间天气业务监测能力大幅度提升。

另外，还充分利用GPS/MET台网进行了有效的、大空间覆盖的电离层TEC观测。目前，已有800多个GPS监测站数据在空间天气业务中在线应用，广东、上海等地GPS-TEC监测也形成了区域系统。

同时，国家空间天气监测预警中心还是国家重大科学工程“子午工程”的民用预报平台建设单位，该平台建设完成后，大大改善了中心的基础条件和业务

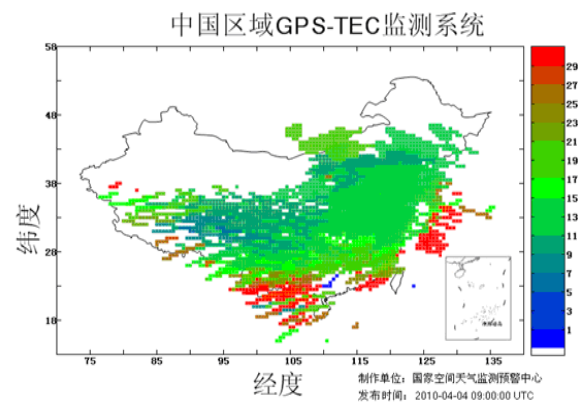
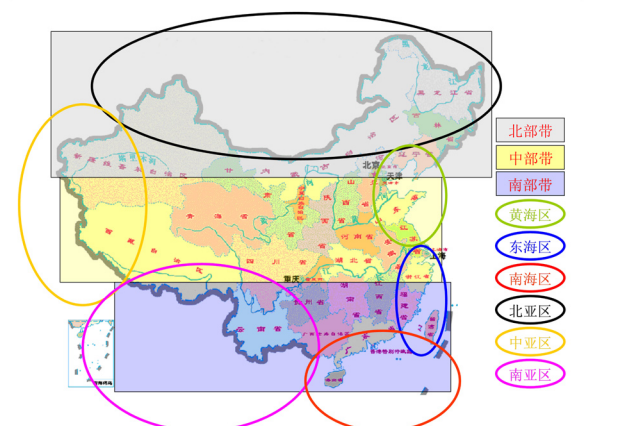


图4 地基建设三带六区布局（左）与GPS-TEC实时监测图（右）

能力。具备了子午工程台站数据的实时获取、分析与应用能力，具备了与国内兄弟单位的联网会商能力。

但与美国相比，我国天基空间天气业务探测能力还有较大的差距，特别是在太阳监测方面差距更大。而在地基监测方面，各发达国家或地区的业务或准业务机构自主的空间天气监测系统并不完整，目前仅美国军方的空间天气地基监测布局比中国气象局的更加精细和庞大。这种状况可能由两个原因造成，一是许多国家的国土面积相对空间天气尺度而言显得太小，不需要也没有足够的疆域建设大量地基监测系统，因此其地基监测往往侧重于某一个具体方面，例如欧洲一些国家多侧重区域性的电离层监测；二是这些国家内和国家间的数据共享机制非常成熟，因此在实际业务或科研中其可用数据非常丰富，例如美国（军方除外）、加拿大和澳大利亚。

### 3.2 预报预警

中国气象局的空间天气业务预报系统是根据空间天气因果链的特点和气象预报预测体系的结构进行设计的。尽管在业务开始之初大量借鉴乃至模仿了NOAA的经验，但随着业务的发展，中国气象局一直致力于将气象预报预测系统的成熟经验系统地引入空间天气预报业务。目前，中国气象局具备了对太阳活动、行星际、磁层、电离层、中高层大气等关键区域的关键要素做出长期、中期、短期预报以及预警和现报的能力，具备了综合数据分析能力、初步的量化分析能力与模式预报能力，形成了由日报、周报、月报、年报、警报、现报和专报组成的系列化预报产品。

在预报业务方面取得的进展还包括：完成国内第一部《空间天气业务预报技术规范》；制定了14项预报业务规范，其中3项申请了行业标准，3项申请了国家标准；12种预报产品（表4）通过职能司审定正式成为气象预报产品；初步制定了预报产品质量检验标准；关键空间天气参数的预报准确率居国内先进水平，与国际水平相当。

与美国SWPC相比，国家空间天气监测预警中心的日常预报产品种类相似，预报精度相当。但需要关注的是，在空间天气源头（太阳和太阳风）监测数据方面，还强烈依赖于SWPC的数据，这是我国空间天气预报业务中的最大隐患之一。同时，在数据产品的加工和应用、预报技术的引进与发展等方面，我国距国际先进水平还有一定距离。

### 3.3 应用服务

如前所述，“空间天气”之所以不同于“日地空间物理”，就是因为其考虑了自然现象和技术系统之

表4 空间天气主要预报产品

预报要素	产品名称	预报时效
太阳活动	F107指数	24~72小时
	M级耀斑概率 X级耀斑概率 质子事件概率	24~72小时
	太阳黑子数中期预报	3~27天
	F107指数中期预报	3~27天
	太阳黑子数长期预报 F107指数长期预报	1~5年
地磁活动	Ap指数 小地磁暴概率 大地磁暴概率	24~72小时
	单站临频预报 TEC现报	24小时 1小时

间的关系，因此使得空间天气业务具备为相关用户提供服务的可能。应该说，空间天气应用服务是空间天气业务工作的出发点和归宿，是空间天气业务工作最终体现社会价值的关键环节，也是业务工作不同于其他科研工作的关键区别所在。

由于用户和潜在用户对于空间天气业务的认知度还不够，因此中国气象局的空间天气应用服务首先设计了总体构架，随后不断培养用户群体，并逐步开展和深化服务。应用服务的内容主要包括决策服务、公众服务、专业服务和用户培养。决策服务可通过重大事件或活动的保障服务引起决策部门关注，有利于争取国家支持；专业服务可通过对分类用户提供持续的事件警报和规避措施建议来深化有关行业对空间天气的认识，有利于培养专业用户；公众服务则通过对大的空间天气事件的宣传来普及空间天气知识，有利于加强公众对空间天气业务的理解和接受；用户培养则是让用户知道空间天气的影响并与用户一起设计和深化服务方案。

通过多年的实践，中国气象局空间天气应用服务进一步明确了以决策服务为首位、航天/卫星服务为重点、无线电通信与卫星导航定位服务为突破口的服务发展思路，开展了大量空间天气科普宣传和用户培养工作。一系列重要的空间天气保障服务取得了显著效益，积累了大量经验，先后开发了航天器在轨碎片预警系统、高能粒子环境及其辐射效应预报系统、中高层大气环境预报系统、电离层环境预报系统等多个应用服务系统。特别是在重大服务方面取得了突破性的成绩，得到相关用户的高度赞扬。例如，利用风云三号高能粒子探测资料预报的航天员安全出舱起始时间仅与实际出舱时间相差1分钟；基于对卫星常发故障的分析，结合空间天气监测预报，曾准确预报了一次由空间辐射环境改变导致的某通信卫星故障发生时间；基于GPS/MET的电离层TEC实时监测系统通过专

线长期为嫦娥二号的测控提供电离层实况等。

对应用服务进行全面综合考虑是我国空间天气业务的重要特点之一，它是我国气象服务的中国特色的一种体现。但这种努力还处在比较初级的阶段，在一些特定的专业服务方面与一些国家还存在显著的差异，如澳大利亚气象局无线电服务、加拿大资源部的输油管道服务已经非常细致，美国许多公司在电力服务方面已经实现市场化，而我国绝大部分受空间天气影响的行业对空间天气基本没有认识，更遑论接受空间天气服务了。因此，在中国气象局现有的应用服务实践中，除细化空间天气与技术系统耦合的分析并据此探讨更为实际有效的应对策略和措施外，还特别注重加强科普宣传和用户培养，并将“用户培养”作为服务内容之一。

### 3.4 科技创新

当学术界将关注点从更重基础研究的“日地空间物理学”转向面向应用的基础性学科“空间天气学”时，就注定整个行业的根本驱动力将从单纯的科学探索变为了用户的实际需求。然而，由于空间天气相关知识在我国的普及度还非常低，空间天气对经济社会和国家安全的影响还不如发达国家显著，甚至许多实际已经受到空间天气影响的行业还完全不知道空间天气的存在，因此，我国空间天气学科的发展还未能得到用户的系统认可和支持，这一现状使得空间天气业务作为科学研究和实际应用的桥梁，对于学术界和用户都变得不可或缺。

空间天气业务通过自身的业务建设和为用户的服务，在监测、预报、现象与机理研究、空间天气与技术系统的相互作用方面发现了许多科技问题。这些问题通过适当的渠道反馈给学术界，从而牵引出许多新的研究方向。特别是2007年公益性行业专项的设立，使得中国气象局具备了直接通过项目牵引科研力量来解决业务和应用问题的能力。通过数年的努力，国内大部分与空间天气相关的研究单位都开始不同程度地参与科研成果向业务的转化工作，涉及的方向包括自主数据的综合应用技术、业务化监测技术、新的预报原理和预报方法、预报技术的集成与检验、重点领域应用服务关键技术等众多方向。应该说，目前空间天气行业专项已经成为可能系统影响我国空间天气学科发展的牵引力量之一。

## 4 业务发展的关键在于应用服务的突破

### 4.1 现有不足分析

从我国经济、科技与国防发展的态势来分析，预计再过15~20年的时间，空间天气业务可能会成为气象业务的主要组成部分之一。但就目前的情况来

看，业务能力还远远不够，与国际先进水平之间还有显著差异，其主要表现为：一些必不可少的监测手段依然缺乏，重点区域或针对主要要素的监测台站数量不足，对于灾害和效应的监测还不能满足应用服务的需求；预报要素还未覆盖整个空间天气因果链，预报系统未有效借鉴或移植传统气象业务构架和经验，预报可用性和针对性不足；专业服务还缺乏对空间天气状态与有关技术系统耦合更加深入的了解和分析，从而导致一些决策服务提供的决策依据有限，公众服务还有待全面开展；面向业务能力提升的科研成果储备不够，科研力量不能有效集中于面向业务的科技创新，缺乏有效借用外部力量的机制；业务人才队伍规模还不足以支撑精细化分工，面向用户的科技人才缺乏，严重制约了应用服务的深化和拓展。

上述问题的解决要涉及很多方面，但其核心还是要实现明确的、可定量评价的应用服务效益。因为只有这样，才可能知道需要提升怎样的监测能力、改进什么预报技术。否则，监测和预报能力的改进就只能继续从纯科学研究的角度出发，进而会导致“业务”被还原为“研究”。

空间天气业务的使命就是要将空间天气科学的进步转化为给现代技术系统服务的能力。在空间天气学发展的过程中丰富的监测手段和预报技术积累经过转化后就可以形成一定的业务能力，而能否为经济社会和国家安全提供服务，则是空间天气业务是否存在依据。因此，监测和预报能力不足固然是空间天气业务面临的严峻问题，但这种不足与应用服务的不足相比，就显得不是那么关键了。应用服务的不足甚至会导致已经成规模的事业出现巨大萎缩。例如，美国SWPC的前身曾拥有数百雇员，但当其在航天和国防方面的服务工作被美国航空航天局和国防部承担后，尽管SWPC的预警能力不断提高，依然还是世界空间天气预警中心，但其业务模式不断受到质疑，雇员数迅速下降到100以内，而且预算不断被削减<sup>[17]</sup>。

中国气象局的空间天气业务从无到有，所有的基本能力建设都是显著的成绩。但随着时间的推移，特别是监测与预报业务已经实现稳定运行时，“为什么要进行空间天气业务”、“空间天气业务有什么用”等追问的声音会逐渐增强，而这类问题的根本解答只有有效的应用服务成绩。

### 4.2 应用服务重点

从国际经验来看，航天是空间天气业务的第一大用户。由于种种原因，我国航天界对于空间天气和空间环境的关注主要表现在工程设计与故障归零方面，而且在设计时往往会为环境变化留很大的余

量,因此目前常规的空间天气业务在航天活动中体现的作用相对有限。但随着我国航天事业的快速发展,特别是高精度载荷的不断出现、探索空间范围的不断扩大、任务目标要求的不断提高等,在轨环境、飞行安全、精密测控等越来越需要持续的空间天气保障。但考虑到航天工程的长期性,以及目前我国在空间天气的航天效应分析研究的水平,如果要在在这方面取得突破性的进展,恐怕尚待时日。

在空间天气可能影响的地面系统中,最受关注的是电力输送系统,因为在庞大的现代输电系统中,一个不大的损伤可能导致社会体系的混乱乃至崩溃,例如1989年的加拿大魁北克省大停电事件。目前特别是在高纬地区,如加拿大和北欧等,在电力系统中对空间天气的干扰进行防护已经成为科学界和工业界的共识<sup>[10]</sup>。我国的地理和地磁纬度均偏低,地磁感应电流相对较弱,而且地质结构并不利于地磁感应电流的传播,因此在现阶段我国电力系统受空间天气影响并不明显。但是,在“十二五”期间要建设的超高压输电网的空间跨度大大增加<sup>[20]</sup>,其对空间天气的敏感性将显著增加。因此适时和电力行业一起分析空间天气对我国未来电力系统的影响并开始必要的技术储备,将在未来国民经济发展和安全保障方面取得良好的效益。

目前我国经济社会中受空间天气影响最明显也是最直接的技术系统就是电波通信。尽管现代通信中的有线网络、蜂窝网络等领域主要的常规技术系统并不直接受空间天气的影响,但在保密通信、应急通信、军事通信等依然使用强烈依赖于电离层天气的短波通信以及受电离层显著影响的星地通信作为主要技术手段,而海洋通信更是以短波和星地通信为不可替代的基本通信手段<sup>[21]</sup>。电离层闪烁是影响星地通信的主要空间天气现象,主要发生在高纬和低纬地区,且难以提前预报,因此在这一方面的空间天气服务主要侧重于我国南部地区的电离层闪烁实时监测及短时预警。而在短波通信方面,电离层天气的监测和预报则可以发挥巨大的作用。准确的监测和预报信息不仅可以提高短波信道的接通率,还可以帮助优选通信频率而大大提高信号增益,进而从整体上提高信息的吞吐量。已有的努力表明,中国气象局的空間天气应用服务很可能在这方面取得突破性进展,从而使得空间天气业务真真切切地在经济社会和国家安全中以可量化评估、显著的效益体现出来。

另外,随着卫星定位系统的广泛使用,特别是我

国北斗系统的发展和普及,电离层误差修正及相关拓展应用的需求将更加广泛和精细。中国气象局已有的GPS/MET网络将可以在这方面发挥重要作用。

## 5 结语

空间天气业务的产生是人类迈向现代社会的必然结果,而这种新兴业务成为气象业务的一部分,既是业务所关注的自然空间从地面向太空的延伸,也是业务领域中地面与空间一体化的需求。空间天气业务的重要性随着现代技术的进一步发展会更加显著地体现出来,而业务真正的飞跃还有待于应用服务领域的突破性进展。

### 参考文献

- [1] 王水. 空间物理学的回顾和展望. 地球科学进展, 2001, 16(5): 664-670.
- [2] Lathuillière C, Menvielle M, Lilensten J, et al. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Ann Geophys*, 2002, 20: 1081-1104.
- [3] Kane R P. The idea of Space Weather - A historical perspective. *Adv Space Res*, 2006, 37: 1261-1264.
- [4] Gold T. Plasma magnetic fields in the solar system. *J Geophys Res*, 1959, 64: 1665-1674.
- [5] Georges T M. Ionospheric Effects of Atmospheric Waves. ESSA Technical Report, IER 57-ITSA 54, Boulder, CO, 1967.
- [6] McIntosh P S, Dryer M. (Eds.). *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 30, Martin Summerfield, Series Editor, The MIT Press, Cambridge, MA, 1970.
- [7] 叶宗海, 都亨. 中国的空间环境研究. 地球物理学报, 1997, S1.
- [8] Siscoe G. The space-weather enterprise: past, present, and future. *J Atmos Solar-Terr Physics*, 2000, 62(14): 1223-1232.
- [9] Baker D. How to Cope with Space Weather. *Science*, 2002, 297:1486-1487.
- [10] 王劲松, 张效信, 等译. 美国国家研究理事会, 恶劣空间天气事件——解读其对社会与经济的影响. 北京: 气象出版社, 2011.
- [11] 于晟, 于贵华, 艾印双, 单新建. 地球物理与空间物理学15年回顾. 地球科学进展, 2001, 16(6):861-864.
- [12] 马福臣, 于晟. 空间天气学——人类走向太空急需的新兴学科. 求是, 2002, 10: 60-61.
- [13] 国家自然科学基金委员会. 中国空间天气战略计划建议. 北京, 中国科学技术出版社, 2004.
- [14] 王水, 魏奉思. 中国空间天气研究进展. 地球物理学进展, 2007, 22(4):1025-1029.
- [15] National Space Weather Program. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Service and Supporting Research, 2010.
- [16] 王劲松, 吕建永. 空间天气. 北京: 气象出版社, 2010.
- [17] 2009 Community Review of the NCEP Space Weather Prediction Center. UCAR, 2009.
- [18] World Meteorological Organization. The Potential Role of WMO in Space Weather. WMO Space Programme, April 2008.
- [19] Rodgers D J, Murphy L M, Dyer C S. Benefits of a European Space Weather Programme. DERA Report No. DERA/KIS/SPACE/TR000349, ESWPS-DER-TN-0001, Issue 2.1, December 2000. ESA Space Weather Programme Study (ESWPS).
- [20] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要. 北京: 人民出版社, 2011.
- [21] 胡中豫. 现代短波通信. 北京: 国防工业出版社, 2005.

# 空间天气事件对航天器的影响

呼延奇 蔡震波

(中国空间技术研究院总体部, 北京 100094)

**摘要:** 航天器在太空中运行, 将不可避免地受到空间天气的影响, 而太阳爆发性活动是引发空间天气变化的源头。从2008年10月起, 太阳开始进入第24太阳活动周, 预计于2013—2014年到达太阳活动峰年, 伴随着太阳活动水平会明显加强, 存在发生强空间天气事件的可能性。从航天器工程的角度, 介绍了太阳活动的基本规律, 分析了太阳活动峰年期间的空间环境基本特征, 并阐述了空间天气事件对航天器产生影响的机理与过程, 以期对即将到来的第24太阳活动周峰年对航天器可能产生的影响有一个较为全面和客观的认识。

**关键词:** 空间天气, 太阳活动峰年, 航天器

## Influences of Space Weather Events on the Spacecraft

Hu Yanqi, Cai Zhenbo

(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

**Abstract:** The spacecraft orbiting in space will be affected by space weather inevitably, while the solar explosive event is the source of space weather variations. From October 2008 on, the sun enters solar cycle 24. It is predicted that the solar maximum will arrive in 2013—2014, while the solar activity will be enhanced significantly and severe space weather events may occur. In view of spacecraft engineering, this paper introduces the common principle of the solar activity and the basic characteristics of space environment during the solar maximum, and then describes the mechanism and process of space weather events having an effect on the spacecraft, in order to comprehensively and objectively understand the possible influence of the upcoming 24th solar maximum on the spacecraft.

**Key words:** space weather, solar maximum, spacecraft

航天器在太空中运行, 将不可避免地受到空间天气的影响, 而太阳爆发性活动是引发空间天气变化的源头。从2008年10月起, 太阳开始进入第24太阳活动周。目前国内外空间物理学界的预测表明, 太阳将于2013—2014年到达第24太阳活动周峰年, 期间太阳活动水平会明显增强, 存在发生大规模太阳爆发性活动的可能性, 其引发的近地空间环境扰动事件称为空间天气事件。自从1957年首颗人造航天器升空以来, 航天活动已经经历了第19周至第23周共五个太阳活动周, 在每个太阳活动周尤其在太阳活动峰年期间, 均不同程度地出现过强空间天气事件引发航天器异常甚至失效的事例。

本文从航天器工程的角度, 介绍了太阳活动的基本规律, 分析了太阳活动峰年期间地球空间环境的基本特征, 阐述了空间天气事件对航天器产生影响的机理与过程, 以期对即将到来的太阳活动峰年对航天器可能产生的影响有一个客观和全面的认识。

### 1 太阳活动峰年地球空间环境基本特征

#### 1.1 太阳活动周

太阳活动是指太阳外观和输出能量的各种变化过

程。太阳爆发性活动的发生频率取决于太阳活动水平, 长期的科学观测表明, 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可能为9~13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、极大期、下降期和极小期。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, 平均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, 日面爆发性活动逐渐减弱, 黑子数量也越来越少, 平均黑子数极小的一年, 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。

1957年首颗人造地球卫星上天时, 正处于第19太阳活动周, 而现在第23太阳活动周已经结束, 太阳于2008年10月开始进入第24太阳活动周。空间物理学界预测, 2013—2014年将达到第24太阳活动周的峰年。图1为实际观测记录的第1~23太阳活动周的年均黑子数, 黑子数最大值对应的年份是太阳活动峰年, 黑子数最小值对应的年份为太阳活动谷年。

收稿日期: 2011年10月10日; 修回日期: 2011年11月12日

第一作者: 呼延奇(1982—), Email: yqhu@spaceweather.ac.cn

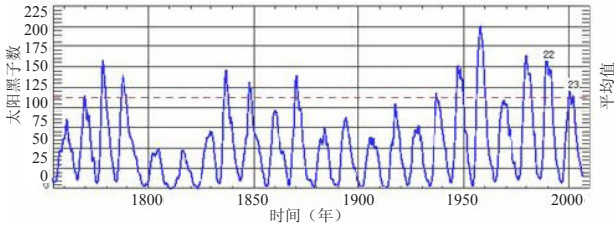


图1 第1~23太阳活动周黑子数实际观测结果

### 1.2 第24太阳活动周强度预测

据美国国家大气海洋局（NOAA）预测，新的太阳活动峰年将在2013年下半年至2014年上半年出现，NASA马歇尔飞行中心最新发布的预测结果显示（图2），第24太阳活动周年均黑子数峰值为70左右，是近五个太阳活动周中最低的。

虽然从目前的预测结果看，第24太阳活动周太阳活动水平不会太强，但也不能掉以轻心。这是因为，从历史观测记录看，具体某一次空间天气事件的强度与其所处太阳活动周的强度（用太阳黑子数表征）关联性不大。例如，历史上有记录的最强空间天气事件——1859年9月“卡林顿”事件，发生于第10太阳活动周峰年附近，第10太阳活动周年均黑子数峰值为100左右；而有记录以来的最强太阳活动周是第19太阳活动周，年均黑子数峰值（1959年前后）达到200。具体某一次空间天气事件的强度主要取决于太阳爆发源区（即太阳表面的活动区，通常就是黑子群出现的位置）的局部磁场结构和能量释放机制。

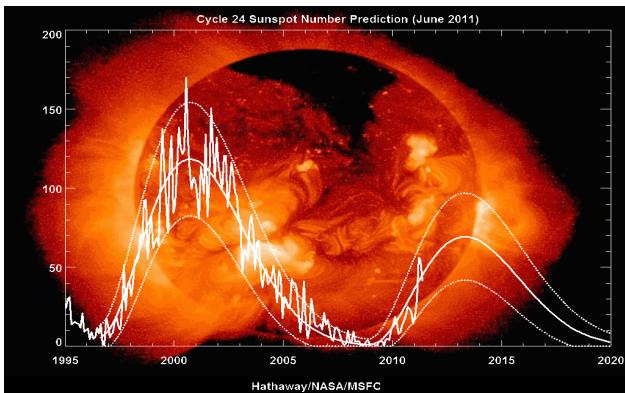


图2 NASA于2011年6月发布的24太阳活动周黑子数预测  
(图片来自http://www.nasa.gov)

### 1.3 太阳峰年期间地球空间环境基本特征

#### 1.3.1 空间天气事件规模和频率增加

图3给出了航天活动经历过的第19~23太阳活动周期间发生的太阳质子事件质子积分通量与月均黑子数的关系。可以看出，规模较大的太阳质子事件（质子通量高）多出现在太阳活动水平较高的时期（太阳黑子数较多），太阳质子事件的强度和出现的次数与太阳活动周期存在明显的相关性。

不过，需要指出的是，太阳爆发具有突发性的特点，其引发的大规模空间天气事件并非只在太阳活动

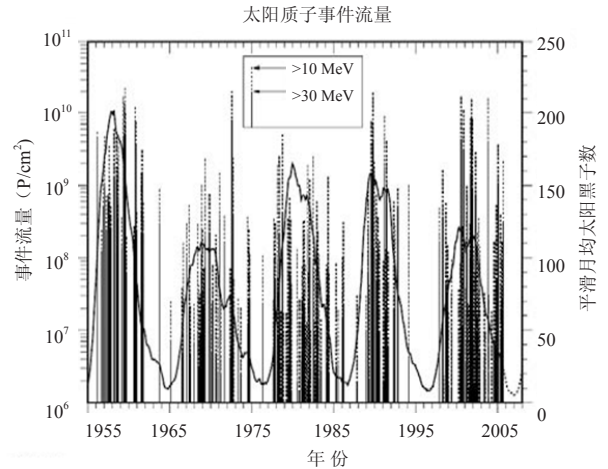


图3 第19~23太阳活动周发生的太阳质子事件与太阳黑子数关系<sup>[1]</sup>

峰年才会出现，在太阳活动周的上升期和下降期甚至太阳活动谷年，也存在发生大规模空间天气事件的可能，典型的如1994年1月导致加拿大通信卫星Anik E1/E2等多颗卫星在轨异常的空间天气事件，就发生在第22太阳活动周谷年附近。但一般地，太阳活动谷年出现大的空间天气事件的可能性很低，在刚刚过去的第23太阳活动周的太阳活动谷年（1995—1996年）的两年期间，没有出现过一次大的空间天气事件。

#### 1.3.2 地球空间辐射环境强度有升有降

太阳活动水平除了决定太阳爆发性活动的频次以外，还对地球空间辐射环境存在显著的调制作用，太阳活动峰年和谷年期间地球空间辐射环境具体差异见表1。

太阳活动峰年期间，并非所有环境要素都增强，某些空间辐射环境要素（如银河宇宙线和捕获质子通量）在太阳活动峰年反而减弱，与太阳活动水平呈负相关的关系。

表1 太阳活动峰年与谷年地球空间辐射环境差异

	捕获质子 通量	捕获电子 通量	太阳耀斑质 子通量	银河宇宙线 通量
峰年	↓	↑	↑	↓
谷年	↑	↓	↓	↑

#### 1.3.3 太阳爆发喷射的物质在日地空间传播存在方向性

带电粒子在行星际空间中传播时受太阳磁场的调制作用，太阳磁场在黄道面内基本呈阿基米德螺线状。太阳爆发喷射的物质在行星际空间传播时存在方向性，并非所有太阳爆发性活动产生的高能粒子及等离子体云（日冕物质抛射，CME）均能到达近地空间。事实上，许多朝太阳背面喷发的CME在地球空间是观测不到的，而卫星监测数据也显示位于太阳西半球的太阳爆发性活动产生的粒子更容易到达地球空

间, 进而对地球空间航天器造成影响。

## 2 空间天气事件影响航天器的机理和过程

空间天气事件的源头是日面发生的剧烈爆发活动, 它主要以光和粒子的形式释放能量, 具体可分为三种, 一是太阳电磁辐射突然增强, 即“光”的增强; 二是喷射大量的高能带电粒子流; 三是抛射高速等离子体云, 即CME。这三类物质和能量形式到达地球附近时, 会引起近地空间中的粒子环境和电磁辐射环境发生剧烈变化, 它们与航天器上的元器件及材料发生多种复杂的相互作用, 通过引发电离总剂量效应、位移效应、单粒子效应、表面充放电效应、内带电效应、大气阻力、电离层扰动等方式, 对航天器产生影响与危害。图4为空间天气事件影响近地空间环境的示意图。

### 2.1 空间天气事件产生的典型危害

#### 2.1.1 电离总剂量效应

空间带电粒子与航天器上采用的元器件和材料发生撞击时, 可通过电离作用将部分甚至全部能量传递给元器件和材料, 使其性能发生变化, 这就是所谓的“电离总剂量效应”。

随着接受剂量的增加, 电子元器件、材料和电路的性能将会发生漂移, 功能出现衰退。当累积剂量超过元器件或材料所能承受的最大剂量时, 其性能就会被损坏或完全失效, 从而对在轨航天器造成严重威胁。

#### 2.1.2 位移效应

高能粒子与材料的相互作用过程中除了通过电离相互作用交换能量外, 还可以通过非电离相互作用交换能量, 即产生非电离能量损失, 简称非电离能损。非电离能量损失是高能粒子与原子核的相互作用, 产生原子的移位, 通常称为位移效应。

受位移效应影响最大的主要是利用少数载流子工作的器件, 例如双极结型晶体管、太阳电池、电荷耦

合器件 (CCD) 和光电耦合器等。位移效应会造成电子器件的信噪比变差, 输出信号衰减等。强空间天气事件期间, 航天器轨道上的高能质子通量显著增加, 将引起星上相机、星敏感器等成像载荷的成像质量严重下降, 甚至出现短时无法成像、卫星姿态数据不可用等问题。高能带电粒子会对太阳电池造成持续的损伤, 导致太阳电池的输出功率下降, 甚至有可能使太阳电池在任务后期不能满足航天器能源需求。

#### 2.1.3 单粒子效应

单个的空间高能质子或重离子轰击航天器上的微电子器件时, 在其运动路径上通过电离作用产生大量的电子空穴对, 这些电子空穴在器件内部重新分布后, 有时会造成数据错误、电路功能混乱甚至计算机系统瘫痪, 引发卫星在轨异常和故障, 这种由单个高能粒子引发的微电子器件突发异常就是所谓的单粒子效应。

#### 2.1.4 表面充放电效应

航天器表面带电是指沉浸在等离子体环境中的航天器不断地受到带电粒子的撞击, 能量在千电子伏特量级的电子停留在航天器表面, 结果导致航天器表面相对于周围空间呈现负的电位, 由于航天器表面各部位的电导率、设计状态和工况不同, 将出现不等量充电, 使得航天器各部位之间出现电位差。当航天器的表面带电超过一定阈值时, 就会产生静电放电, 干扰航天器的正常运行甚至造成损伤。

#### 2.1.5 内带电效应

当出现大的地磁扰动事件时, 大量的高能电子可注入到地球同步轨道甚至高度较低的轨道, 使得地球辐射带中能量大于1兆电子伏特的电子通量大幅增加。这些电子可直接穿透航天器的蒙皮 (包括外层导电表面和绝缘材料等)、航天器结构和仪器设备外壳, 沉积在航天器内部的电路板、导线绝缘层等深层绝缘介质中, 导致绝缘介质如电路板、同轴电缆等深层处的电荷堆积, 造成介质深层带电, 也就是所谓的内带电效应。

#### 2.1.6 大气阻力

空间天气事件期间, 太阳紫外辐射的增强和地磁暴引发的高能粒子沿磁力线注入极区会加热地球大气层, 使得地球大气层外扩, 导致高层大气密度增加。

大气密度随着高度的增加而迅速减小, 几百千米以上的高层大气密度已经非常稀薄, 但对于高速运动 (7~8km/s) 的航天器而言, 大气阻力仍然是不可忽视的。大气阻力导致航天器轨道衰减, 如果没有足够的燃料来维持轨道, 航天器轨道

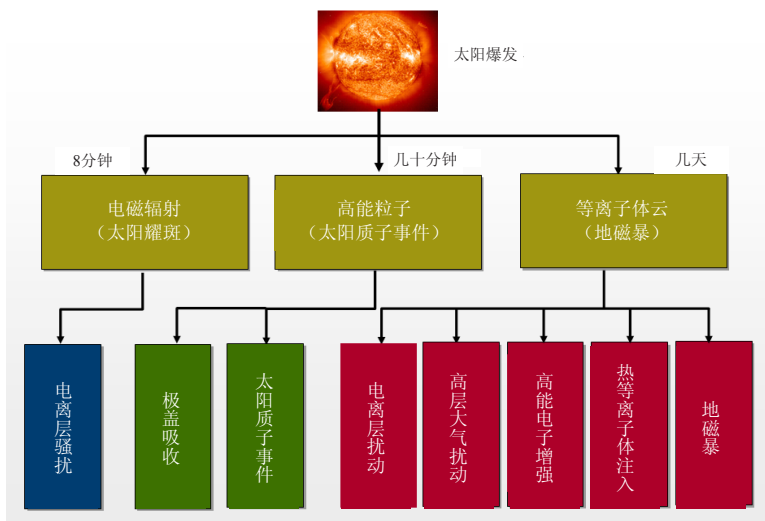


图4 空间天气事件对地球空间环境的影响

高度会大幅衰减，航天器甚至可能提前陨落。

### 2.1.7 电离层扰动

空间天气事件期间，强紫外辐射将使电离层电子密度突然增加，产生大量电离层不均匀体，诱发电离层闪烁。闪烁发生时，信号起伏的峰值在1dB到20多个dB范围内，持续时间从几分钟到数小时，对通信信号产生干扰，严重时导致信号中断。

电离层暴将影响卫星通信质量，由于诱发的电子密度剧烈涨落，电离层对电磁信号的折射误差将大大增加，从而降低定位精度。电离层暴对卫星导航系统的影响主要表现在电离层暴造成的较大电离层延迟梯度变化将影响卫星区域增强系统中的差分技术实现，进而影响卫星导航系统的完好性实现。

## 2.2 空间天气事件影响航天器的过程

太阳爆发期间，其引发的空间天气事件对航天器产生影响的过程与机理，可用图5进行概括。其中，需要强调的是：

不同轨道上的卫星，其影响具有共性，也存在差别。如：对于高轨卫星，可能面临热等离子体引发的表面充放电效应、高能电子引发内带电效应的影响，而对于低轨卫星此类影响可以忽略；对于低轨卫星，可能面临大气加热导致的大气密度增加、原子氧密度增加等效应，而高轨卫星则不会遇到此类效应。

图5中所述的各种影响，只在卫星防护设计有缺陷，或不到位，或环境强度超过卫星防护设计容限之时，才有可能发生。换言之，这些影响一定是在2个

前提条件同时满足时才可能发生，即“环境前提”和“设计前提”，二者缺一不可，抛开防护设计状态到位与否只考虑环境变化，或者抛开环境变化而只考虑防护设计缺陷，以此来讨论卫星是否受到太阳爆发的影响，均不足以客观说明问题。

## 3 空间天气事件引发航天器异常实例

自1957年人类发射首颗人造航天器以来，航天活动经历了第19~23五个完整的太阳活动周，其间尤其在太阳活动峰年附近，发生过数次大的空间天气事件，其中一些事件对在轨卫星产生了严重影响。典型事例有：

### 3.1 1989年3月空间天气事件

1989年位于第22太阳活动周峰年，1989年3月，太阳表面爆发了较大规模的CME事件，并引发了特大磁暴，对多颗卫星<sup>[2]</sup>产生了严重影响，具体见表2。

### 3.2 1989年10月特大太阳耀斑事件

1989年10月特大太阳耀斑是第22太阳活动周峰年的代表性极端事件，事件发生后，近20颗卫星发生在轨异常，其中美国GOES-7卫星的太阳电池阵输出电流严重衰减<sup>[3]</sup>，相当于7年多的预期电流衰减量（即寿命减少7年），具体结果见图6。

### 3.3 1994年1月特大CME事件

1994年1月20日太阳表面爆发特大CME事件，该CME到达地球空间后导致加拿大通信卫星Anik-E1陀螺制导系统发生故障，卫星姿态失控，开始自旋，采取启动备份措施8小时后恢复，中断通信服务8小时，

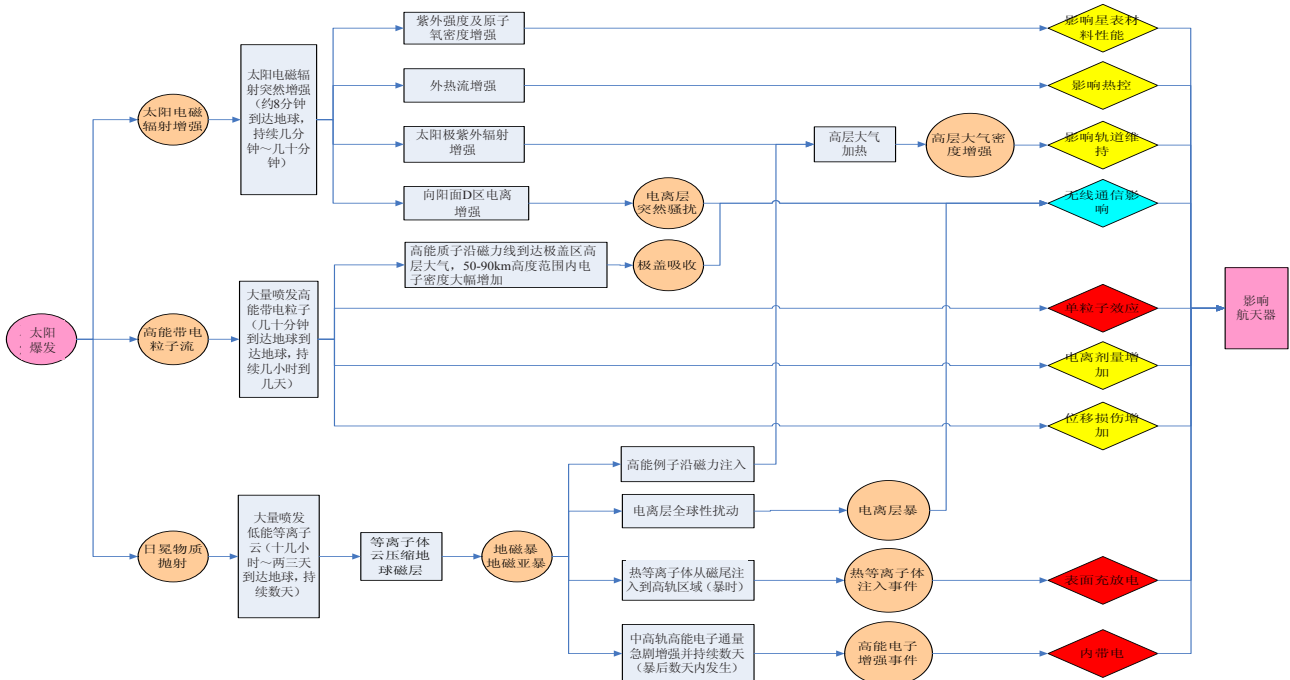


图5 空间天气事件对航天器产生影响的基本过程

表2 1989年3月太阳事件引起的部分卫星故障

卫星名称	影响
GOES-7 (美国地球环境业务卫星)	3月12日通信线路异常, 丢失气象图片。
CS-JB (日本地球同步轨道卫星)	3月17日世界时10:50,指令系统永久损伤, 启动备份系统。
MARECS-1 (欧空局地球同步轨道卫星)	3月2日、17日、29日多次发生了“开关事件”。
GMS-3B (日本地球同步轨道气象卫星)	3月22日, 世界时12时、14时, 遥测信号出现强烈扰动, 丢失一小时数据。
TDRS-D (跟踪与数据中继卫星)	从“发现号”航天飞机上发射后, 在大椭圆轨道运行和在同步轨道的前几天内, 姿态遭遇严重问题。
DMSP/NOAA (美国极轨气象卫星)	因地球磁场发生了巨大变化, 使磁力矩卸载发生困难。
TIROS (美国极轨气象卫星)	强磁暴期间, 姿控飞轮转速达到设计极限值, 紧急启用备份系统才把姿态控制住, 如强磁暴再持续24小时, 姿态将失控。
1988-24A (中国实用通信卫星)	3月9日, A、B、C、D四台转发器增益同时跳档, 由原4分贝跳变为2分贝, 增益档的遥测值均为“0”。
SMM (美国太阳峰年卫星)	轨道高度下降了3英里。

陀螺制导系统主份永久性损坏。Anik-E1失控2小时后, Anik-E2发生同样异常, 卫星业务全部中断, 启动备份7个月后恢复正常, 陀螺制导系统主份永久损坏。几乎与Anik-E1和Anik-E2卫星出现在轨异常的同时, 美国Intelsat-K卫星也发生了类似的异常现象。经近两年的研究, 确认此次事件是CME引发的高能电子暴, 导致卫星内部充电进而引发静电放电(内带电效应)造成的。

### 3.4 2003年10月底“万圣节事件”

2003年10月底至11月初的“万圣节事件”期间, 太阳表面至少发生了6次X级耀斑(属于特大耀斑), 造成GEO轨道高能质子通量突然增加4个数量级并持续约10天, 引发多颗卫星<sup>[4]</sup>出现疑似单粒子事件造成的异常。较大规模的太阳质子事件(尤其是极端事件)期间, 对在轨航天器的正常工作可产生较严重的

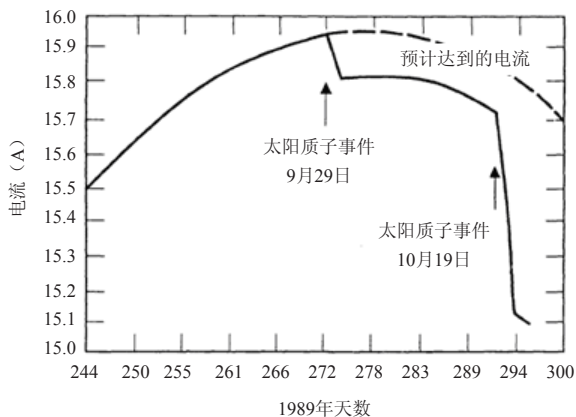


图6 GOES-7卫星太阳电池损伤

影响。一次事件, 可能会同时影响多个卫星。太阳质子事件对卫星的影响, 不局限于某个特定轨道, 而是对各种类型轨道航天器均可造成影响。

### 3.5 2010年4月5日“清明节事件”

2010年4月5日发生了自2008年10月以来最强烈的地磁暴(“清明节事件”), 地磁Kp指数达到7, Dst指数超过-70nT; 此次事件期间没有观测到太阳质子事件; 之前发生的太阳耀斑为B7.4级, 持续时间1小时54分; 伴随一次CME事件, 太阳风速达到750km/s。

此次事件导致美国Galaxy-15卫星在轨出现异常并失控, 卫星不能接收上行测控信号, 目前该卫星已被宣布为“僵尸卫星”。针对此次卫星故障, 负责该卫星运营的美国轨道公司目前尚未就故障原因给出明确结论, 但初步分析显示Galaxy-15卫星故障可能与“清明节事件”存在关联性。

## 4 小结

第24太阳活动周峰年预计于2013—2014年到来, 伴随着空间天气事件发生的强度和频率会显著增加, 但总体来看, 第24太阳活动周与航天活动已经经历过的第19~23太阳活动周一样, 是太阳活动规律性的正常表现。

在航天活动经历过的五个太阳活动周内, 尤其是在太阳活动峰年附近, 确实出现过强空间天气事件引发在轨航天器故障甚至失效的事例。随着第24太阳活动周峰年的到来, 空间天气事件的强度和极端事件出现的可能性会显著增加, 其引发的近地空间环境扰动可通过不同的机制与航天器上的元器件和材料、电子系统发生耦合, 进而引发各种空间环境效应, 如果航天器自身的空间环境防护设计不到位或存在设计缺陷, 在遭遇强空间天气事件时, 可能会引发航天器故障甚至造成个别航天器失效。

为增强航天器对恶劣空间天气的适应性, 有必要从元器件及材料选取、系统设计等不同层面采取必要的防护措施, 并严格控制各项设计措施的落实, 同时还亟需提升对空间天气的监测和预警能力。

### 参考文献

- [1] Reedy R C. Solar-proton event-integrated fluences during the current solar cycle. 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Abstract NO. 1419, 2006.
- [2] Bedingfield K L, Leach R D, Alexander M B. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment. NASA Reference Publication 1390, 1994.
- [3] Marvin D C, Gorney D J. Solar proton events of 1989: effects on spacecraft solar arrays. Aerospace Report TR-0091(6945-01)-2, 1992.
- [4] NOAA. Halloween space weather storms of 2003. NOAA Technical Memorandum OAR SEC-88, 2004.

# 国际上的空间天气计划与活动

郭建广 张效信

(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 随着科技的发展和进步, 越来越多的国家和国际组织已经认识到空间天气的重要性。回顾了近些年来不同的国家和组织在空间天气领域开展的计划与活动, 主要包括空间天气的一些地基和地基探测计划, 以及相关的国际合作情况, 最后简单介绍中国空间天气方面所做的努力。

**关键词:** 空间天气, 空间天气灾害, 空间天气计划与活动, 国际空间天气组织

## The International Space Weather Projects and Activities

Guo Jianguang, Zhang Xiaoxin

(National Satellite Meteorological Center /National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** With the development of science and technology, more and more organizations and countries have recognized the importance of space weather. This paper reviews the activities of some organizations and countries related to space weather in recent years, including space-based and ground-based observation projects and the international cooperation. A brief description of China's effort in space weather is also given in the paper.

**Key words:** space weather, space weather hazard, space weather project and activity, international space weather organization

### 1 引言

“空间天气”(Space Weather)一词最早出现于20世纪70年代前后<sup>[1]</sup>,如同大气中的千变万化,太空中也存在着“空间天气”。空间天气是指可以影响地基和地基技术系统并危及人类生活和健康的太阳、整个空间,以及地球磁场和高层大气的各种状态。恶劣的空间天气可引起卫星运行、通信、导航以及输电网络的崩溃,给人类活动带来巨大损失,例如:1989年3月发生历史上罕见的空间灾害性天气事件,造成卫星提前陨落,无线电通信中断,轮船、飞机的导航系统失灵,美国核电站变压器烧毁,加拿大北部电网烧毁等,引起国际社会的震惊。2009年1月,美国科学院发布报告警示,“一旦类似1859年的超级太阳风暴来袭,我们根本无力应对”<sup>[2]</sup>。随着人类科技的不断进步,人类活动依赖的技术系统对空间天气的脆弱性也极大地增长起来。

美国于1995年率先制定“国家空间天气战略规划”,随后于1997年、2000年发布美国“国家空间天气执行计划”,2010年又发布了新版的“国家空间天气战略规划”,延续和扩充1995年的计划,应对即将

到来的太阳活动高年<sup>[3-5]</sup>。欧空局(ESA, European Space Agency)根据欧盟国家的特点,以市场为引导,主持制定了欧洲空间天气计划,而法国、德国、英国、意大利、俄罗斯、加拿大、瑞典、日本、澳大利亚等数十个国家也都制定了各自的空间天气计划。中国于1999年由国家科技部等10个部委提出“国家空间天气战略规划建议”,将空间天气作为中长期科技发展规划和基础学科重要的优先发展领域之一。

一些国际组织也开始进入空间天气领域,如空间研究委员会(COSPAR, The Committee on Space Research)成立相应的空间天气小组(Panel on Space Weather),国际科学协会理事会(ICSU, International Council of Scientific Unions)所属的日地物理科学委员会(SCOSTEP, Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics)也设立了空间天气科学与应用专题委员会,特别是世界气象组织(WMO, World Meteorological Organization)也意识到空间天气的重要性,成立国际空间天气计划协调组(ICTSW, The Inter-Programme Coordination Team for Space Weather),并开始组织协调空间天气事务。

### 2 国际空间组织开展的空间天气计划与活动

#### 2.1 国际空间环境服务机构(ISES)

国际空间环境服务机构(ISES, International Space Environment Services)是天文与地球物理数据

收稿日期: 2011年8月31日; 修回日期: 2011年10月8日  
第一作者: 郭建广(1978—), Email: guojg@cma.gov.cn  
通讯作者: 张效信(1963—), Email: xxzhang@cma.gov.cn  
资助信息: 财政部气象行业专项“空间天气量化预报技术及其集成”(GYHY200806024)

分析服务联盟 (FAGS, Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services) 在国际无线电科学联盟 (URSI, International Union of Radio Science) 与国际天文联盟 (IAU, International Astronomical Union) 和国际大地测量和地球物理联盟 (IUGG, International Union of Geodesy and Geophysics) 的联合资助下的常设服务机构, 其主要目的是推动和促进全球空间环境准实时的监控和预测。ISES 目前拥有 13 个区域预警中心 (RWC, Regional Warning Center), 分别位于中国、美国、俄罗斯、印度、加拿大、捷克、日本、澳大利亚、瑞典、比利时、波兰、南非和巴西 (图1), 而位于法国的联合预警中心为客户提供专业服务, 并通过比利时区域预警中心成为会员之一。中国区域警报中心 (RWC-China) 设于北京天文台, 1992 年加入 ISES, 原为中国科学院有关单位联合电子工业部电波所、北京大学和武汉大学有关院系成立的日地物理预报中心, 其原称为 RWC-Beijing。

ISES 有三项基本的职能, 分别为: (1) 国际科技资料传送服务中心通过 RWC 提供标准化空间天气信息和预报的快速自由的交换; (2) ISES 每年将筹备国际地球物理日历 (IGC, International Geophysical Calendar), 国际地球物理日历给出了科学家们被鼓励开展一系列实验的“世界日”列表; (3) 每月空间预警公报将概括卫星在地球轨道和行星际轨道中所处的状态 (<http://www.ises-spaceweather.org/>)。

## 2.2 空间研究委员会 (COSPAR)

COSPAR 于 1958 年 10 月成立, 隶属于 ICSU, 其成立的初衷是: 在共同合作的基础上, 为了共同的科学目的, 将研究各类卫星和空间探测器的方法提供给世界科学团体。

COSPAR 是一个多学科性的科学组织, 在国际范围内通过学术交流和组织实施国际研究项目, 其项目涉及到火箭、飞船、高空气球等各个空间研究领域。COSPAR 的主要学术活动中, 规模最大、涉及学科领

域最广的是两年一届的空间科学大会, 与国际宇航大会、世界数学家大会齐名, 大约有 80 个研讨会和专题学术会, 参加人数 1500~2000 人左右。我国自 1993 年 3 月 1 日正式加入 COSPAR, 还曾于 2006 年 7 月承办了第 36 届空间科学大会。COSPAR 与 ICSU 联合创办了期刊《空间研究进展》(*Advance in Space Research*), 主要侧重于报道空间科学的最新研究成果, 涉及气象、气候、地一月系统、行星及太阳系小天体等, 其文章多来自 COSPAR 举办的各种会议。此外 COSPAR 还在发展中国家组织了一系列的能力建设培训班, 目的是在 COSPAR 感兴趣的领域传播实用的知识, 加强发展中国家在空间科学领域的的能力, 曾在中国举办过“磁层多卫星探测的数据分析” (2004 年, 中国北京) 和“月球和行星表面科学” (2009 年, 中国哈尔滨) 两个培训班。

## 2.3 日地物理科学委员会 (SCOSTEP)

SCOSTEP 是隶属 ICSU 的又一国际空间天气组织, 它的前身是日地物理联合会间委员会 (IUCSTP, Inter-Union Commission on Solar-Terrestrial Physics), 成立于 1966 年, 1972 年改为日地物理特别委员会, 1973 年定名为日地物理科学委员会, 即 SCOSTEP, 2010 年 5 月起其秘书处设在加拿大约克大学。中国空间科学学会自 1990 年起, 作为团体会员加入 ICSU 下属的 SCOSTEP。

SCOSTEP 主要与加入 ICSU 的机构合作, 协调和组织国际间的日地空间物理计划, 曾经实施过“国际地球物理年” (IGY, International Geophysical Year: 1957—1958)、国际宁静太阳年 (IQSY, International Quiet Sun Year: 1964—1965)、国际磁层研究 (IMS, International Magnetospheric Study: 1976—1977)、极大太阳年 (SMY, Solar Maximum Year: 1979—1981)、中层大气计划 (MAP, Middle Atmosphere Program: 1982—1985), 以及国际日地能量传输计划 (STEP, Solar-Terrestrial Energy Program: 1990—1997)。其中 IGY 是世界各国第一次对地球物理现象进行联合规模观测, 有包括中国在内的 67 个国家参加, 共同对南北两极、高纬度地区、赤道地区和中纬度地区进行了全球性的联合观测, 涉及的科学研究内容包括气象学、地磁和地电、极光、气辉和夜光云、电离层、太阳活动、宇宙线与核子辐射、经纬度测定、冰川学、海洋学、重

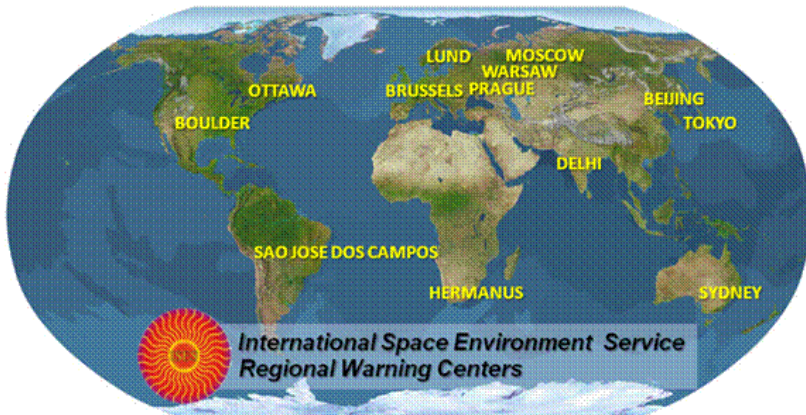


图1 ISES区域预警中心地理分布<sup>[6]</sup>



图2 ILWS中部分备选的卫星计划<sup>[7]</sup>

卫星参与的国际空间合作探测计划——“国际与太阳同在”（ILWS, International Living With a Star），几乎涉及了所有与卫星有关的国家，该计划旨在系统探测从太阳到地球之间的各种空间活动，图2给出了ILWS计划中的部分探测卫星计划，包括日地关系天文台（STEREO, Solar TERrestrial RELations Observatory, 2006年10月发射升空）、太阳动力学观测卫星（SDO, Solar Dynamics Observatory, 2010年2月发射升空）、辐射带风暴探测卫星（RBSP, Rad Belt Storm Probes, 预计2012年发射）、磁层多尺度卫星（MMS, Mag

MultiScale, 预计2014年发射）等计划<sup>[7]</sup>。

力测定、地震、火箭与人工卫星探测13个项目。而STEP则是20世纪90年代国际上规模最为宏大的国际合作计划，包括美国、前苏联、日本等数十个国家和地区的20多颗探测卫星参加<sup>[6]</sup>。目前正在执行的是日地系统空间气候和天气计划（CAWSES, Climate and Weather of the Sun-Earth System），旨在从整体的角度研究日地空间系统，目前该计划已进入第2期（CAWSES II: 2009—2013）。

## 2.5 国际地磁学和高空大气学协会（IAGA）

## 2.4 国际空间局协调组（IACG）

到了20世纪最后两个十年中，各空间大国在国内和国际上开展了一系列日地空间联合观测与研究的大规模合作。由美国国家航空航天局（NASA, National Aeronautics and Space Administration）、ESA、日本的宇宙科学研究所（ISAS, Institute of Space and Astronautical Science of Japan）和前苏联科学院宇宙理事会（Intercosmos Council of the Soviet Academy of Sciences, 后为俄罗斯航空航天局, RASA, Russian Aviation and Space Agency）组成的国际空间局协调组（IACG, The Inter-Agency Consultative Group），组织和协调了规模空前的空间探测计划，国际日地物理计划（ISTP, International Solar-Terrestrial Physics），该计划的主要科学目标是：将日地空间作为一个整体系统，在日地空间发射多颗卫星，如太阳和日球层探测器（SOHO, Solar and Heliospheric Observatory, 1995年12月发射升空）、星簇计划（Cluster II, 2000年7月和8月发射升空），对日地系统连锁变化的物理过程进行探测和研究。2002年IACG又提出了被称为人类21世纪前20年最大规模的，有数十颗

IUGG下属的国际地磁学和高空大气学协会（IAGA, International Association of Geomagnetism and Aeronomy）也是一个国际性的空间天气组织，成立于1919年，当时为IUGG的地磁和地电组，1930年改为国际地磁和地电协会（IATME, International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity），1954年改为国际地磁学和高空大气学协会，即IAGA，主要是为了促进地磁学和高空大气学方面的国际合作与研究，涉及的领域包括地球内部、中高层大气、电离层和磁层，以及太阳、太阳风、行星和行星际天体等，除此之外，台站、仪器、指数和数据等内容也是IAGA关注的范围。

IAGA制作发布的国际地磁参考场（IGRF, International Geomagnetic Reference Field）以及世界磁场异常分布图（WDMAM, World Digital Magnetic Anomaly Map），在地球内部、地壳、电离层和磁层等领域中有着非常广泛的应用，而空间天气领域中常用的表征地球磁场活动水平的地磁指数，如Kp和Dst等指数，也是IAGA的主要出版物。此外，IAGA还定期举办科学大会，研讨最新的科研进展，促进国际间的科学合作（<http://www.iugg.org/IAGA/>）。

## 2.6 联合国和平利用外层空间委员（COPUOS）

目前联合国中涉及空间天气事务的主要机构是联合国和平利用外层空间委员会（COPUOS, United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space），现有包括中国在内的69个成员国，秘书处设在维也纳。COPUOS的宗旨是制定和平利用外空的

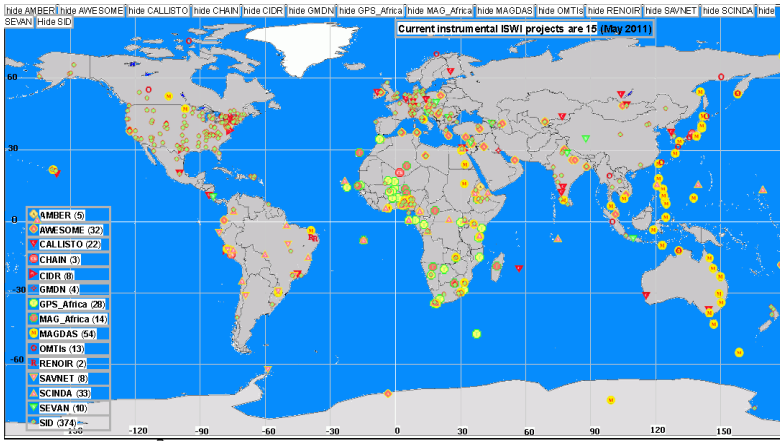


图3 加入ISWI的空间天气监测计划的分布情况

原则和规章，促进各国在和平利用外空领域的合作，研究与探索和利用外空有关的科技问题和可能产生的法律问题。COPUOS在空间天气领域的经常性活动有：研究并促进空间减灾、远程教育、气象、通信、导航、直接广播和遥感地球资源等各种卫星的国际合作；举办国际、区域和区域间的研究会议及讨论会和讲习班；促进外层空间研究的情报交换等。国际日球物理年（IHYP, International Heliophysical Year），

表1 加入ISWI的空间天气监测计划

序号	国家	项目名称
1	美国	非洲赤道电动力学研究GPS网 African GPS Receivers for Equatorial Electrodynamic Studies (AGREES)
2	法国	非洲双频GPS网 African Dual Frequency GPS Network (AMMA)
3	美国	非洲子午圈地磁场变化研究 African Meridian B-field Education and Research (AMBER)
4	美国	用于监测和建模的大气层天气教育系统以及电离层骚扰监测系统 Atmospheric Weather Education System for Observation and Modeling of Effects. SID, Sudden Ionospheric Disturbance Monitor (AWESOME)
5	瑞士	用于能谱学和移动式观测台的低成本低频复合天文仪器 Compound Astronomical Low-cost Low-frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory (CALLISTO)
6	日本	H $\alpha$ 单色成像监测网 Continuous H-alpha Imaging Network (CHAIN)
7	美国	电离层相干多普勒雷达 Coherent Ionospheric Doppler Radar (CIDR)
8	日本	全球介子探测网 Global Muon Detector Network (GMDN)
9	日本	磁场数据获取系统 Magnetic Data Acquisition System (MAGDAS)
10	日本	中层和热层光学成像仪 Optical Mesosphere Thermosphere Imager (OMTIs)
11	美国	赤道区夜间电离层遥感监测系统 Remote Equatorial Nighttime Observatory for Ionospheric Regions (RENOIR)
12	巴西	南美洲电离层甚低频监测网络 South America Very Low Frequency Network (SAVNET)
13	美国	电离层闪烁辅助监测网 Scintillation Network Decision Aid (SCINDA)
14	亚美尼亚	空间环境监测和分析网络 Space Environment Viewing and Analysis Network (SEVAN)
15	以色列	超低频/极低频/甚低频监测网 ULF/ELF/VLF network

是COPUOS组织的具有里程碑意义的国际科学合作计划，来自70多个国家的数千名科学家参与其中，其主要目标是增进对太阳与地球大气层之间耦合过程的理解，提高国际社会对太阳以及空间天气的认知程度，促进国际间空间天气的合作研究。自IHYP后，COPUOS又发起国际空间天气起步计划（ISWI, The International Space Weather Initiative），继续推动太阳对近地空间环境的影响研究，表1给出了截止到2011年5月加入ISWI的15个空间天气监测计划，其分布

见图3 (<http://www.stil.bas.bg/ISWI/Projects/>)。

### 2.7 国际空间天气计划协调组 (ICTSW)

空间天气从高度上看，可视作传统气象的延伸。实际上，空间天气不仅对气象卫星有着直接影响，更重要的是与气象观测、模拟和服务发布等WMO机构之间存在着潜在的巨大协同作用，WMO可以在协调需求、观测、数据格式和信息交换等操作问题的国际合作方面提供足够的平台，并且WMO在与各应用领域用户交互方面的经验可以给空间天气服务以重要的启示，尤其WMO与国际民航组织（ICAO, International Civil Aviation Organization）和国际电信联盟（ITU, International Telecommunication Union）之间的联系有助于引导航空和通信部门的空间天气服务。

2007年6月15日，WMO收到一封ISES的来信，信中明确表达了ISES希望与WMO合作的意愿。2008年6月，WMO通过了ISES提交的《WMO在空间天气领域的潜在作用》报告，认为空间天气对气象基础设施和重要人类活动具有相当大的影响，并且预计在即将到来的太阳活动周期中，这一影响将会增加，同时也认识到气象与空间天气服务之间的潜在的协同作用<sup>[8]</sup>。2010年5月3日WMO正式成立ICTSW，其目的是指导和协调国际间的空间天气活动，推动空间天气在国际间的合作，特别是促进与ISES之间的合作。

ICTSW目前的成员有13个，分别是澳大利亚、比利时、巴西、加拿大、中国、哥伦比亚、埃塞俄比亚、芬兰、日本、韩国、俄罗斯、英国和美国。2011年5月在日内瓦召开的第16次世界气象大会空间天气边会、卫星高层论坛会议以及空间活动计划会议中，空间天气被确定为WMO的未来工作重点之一。

ICTSW的主要职能包括以下4点：

(1) 通过WMO信息系统(WIS, WMO Information System)实现空间天气资料交换和提供的标准化，并加强这种交换和提供；

(2) 通过与航空及其他主要应用部门的互动，协调确定最终产品和服务，包括质量保障指南和应急事件警报程序；

(3) 通过审议天基和地基观测需求、协调传感器规范，以及监督空间天气观测计划，对空间天气观测进行整合；

(4) 鼓励在空间天气研究团体与业务机构之间开展合作交流。

ICTSW已经向WMO所有成员就空间天气活动征求意见，同时向多个组织机构发出邀请，开展合作交流。目前已经和ICAO、国际海事组织(IMO, International Maritime Organization)、ITU、ISES、OOSA(United Nations Office for Outer Space Affairs, 外太空事务办公室)/联合国和平利用外层空间委员会进行了实质性的合作。

ICTSW目前的工作是确定空间天气观测的核心需求，主要是讨论来自WMO成员的空间天气观测需求的反馈意见，确认提交给WMO的空间天气观测需求。尽管ISES的各个区域预警中心已经有部分业务运行产品和观测需求，但来自其他不同组织和不同用户的观测需求和服务需求也在考虑范围之内。一旦确认了空间天气观测的核心需求，将会选取适当的空间天气观测参量，进行空间天气观测与WMO信息系统之间的整合测试，以便借助WMO在信息共享、传播方面的经验，通过WIS实现空间天气资料交换和提供的标准化，在WMO的多灾种活动框架内(context of multi-hazard WMO activities)发布应急事件警报和保障服务。

### 3 不同国家的空间天气计划与活动

#### 3.1 美国

美国的“国家空间天气战略计划”是一项跨机构的联邦计划，有8个不同的联邦下属组织和机构参与，包括商务部、国防部、内政部，能源部、运输部、国务院、NASA和国家科学基金委(NSF, National Science Foundation)。

在“国家空间天气战略计划”的指导下，美国的空间天气发展迅速，初步建立起完整的空间天气监测、预报和服务体系，空间天气服务广泛而深入。美国的空间天气服务主要由NOAA下属的空间天气预报中心(SWPC, Space Weather Prediction Center, 原空间环境中心, SEC, Space Environment Center)和隶属美国国防部的空军气象局(AFWA, Air Force Weather Agency)提供，两者紧密合作，分别满足民用和军用的需求。2005年，SWPC正式加入国家气象局(NWS, National Weather Service)，空间天气已经正式成为日常气象服务的一部分，目前SWPC空间天气产品的时间尺度涵盖了实时、短期(2~5天)、周、月、季，内容包括空间天气的各种指数预报和警报，逐日空间天气事件的实况资料、评价、专家建议以及事后分析。而且SWPC还在ISES中，作为“全球预警机构”，扮演着全球数据交换和预警的重要角色。SWPC的空间天气业务产品中约有50%的数据源自NOAA发射的GOES系列气象卫星<sup>[2]</sup>，而GOES-R卫星计划正在进行中，其在空间天气方面的监测能力也将全面升级。

在美国国防部，主要由美国空军(USAF, United States Air Force)负责提供实时的空间环境状态，评估空间天气对国防任务中不同部门的影响。USAF还建有独立的空间天气监测网络，如国防气象卫星(DMSP, Defense Meteorological Satellites Program)、太阳电子光学观测网(SEON, Solar Electro-Optical Network)、数字电离层探测系统(DISS, Digital Ionospheric Sounding System)以及GPS网络。此外，国防部还支持了多学科大学研究计划(MURI, Multidisciplinary University Research Initiative)，以解决空间天气建模问题，并在USAF建立空间天气中心(CoE, Air Force Space Weather Center of Excellence)，研发能够判别、预报和减缓空间环境对国防部各系统影响的技术，而美国海军实验室(NRL, Naval Research Laboratory)开发的全球电离层同化模型(GAIM, Global Assimilation of Ionospheric Measurements)，也已在AFWA投入业务运行。

NASA是美国国家级空间天气机构的第三个重要成员。虽然NASA更偏向于科学探测，但其众多科学任务为空间天气业务提供了大量的空间天气监测信息，比如监测上游太阳风的先进成分探测器(ACE, Advanced Composition Explorer)，监测太阳的STEREO卫星和SDO卫星等。另外，NASA还在其多个航天器上配备了无线电信标装置，并将继续在长期的航天任务中搭载，以便为空间天气业务提供及时

的空间环境监测数据。同时，NASA还在戈达德航天中心（GSFC, Goddard Space Flight Center）成立空间天气实验室，将许多理论研究成果转化到空间天气业务中，包括探测器技术以及空间天气物理模式<sup>[2]</sup>。

NSF主要支持基础研究活动及其产生的跨学科的新知识和新技术，但是以提高对空间环境基本过程的认识和改进空间天气的预报能力为目标的理论、观测和数值模式研究，比如太阳的演化和暴发事件、磁层动力学、电离层以及中高层大气动力学这些研究领域也同样会得到NSF的重点支持<sup>[5]</sup>。NSF建立了空间天气集成模式中心（CISM, Center for Integrated Space Weather Modeling），致力于空间天气模式研发，其联合多个组织机构开发的空间天气数值预报模式WSA-ENLIL模型已于2011年初投入业务运行，该模式可以提前1到4天预报太阳风等离子体高速流以及日冕物质抛射（CME）对近地空间环境的影响<sup>[9]</sup>。

美国的一些其他联邦机构也积极推进“国家空间天气战略计划”，隶属美国内政部的地质调查局（USGS, United States Geological Survey）的地磁台站可以持续和高质量地提供地磁观测数据，而USGS根据地磁数据计算的实时Dst指数，也已经在其网站发布（<http://geomag.usgs.gov/dst/>）；美国运输部下属的联邦航空局（FAA, Federal Aviation Administration）计划将空间天气数据和产品整合到下一代航空运输系统中，以满足越来越多的商业航班极区飞行和新兴的商业空间运输领域对空间天气的需求；美国能源部及其国家实验室则重点开发用于全球定位系统和地球同步轨道的粒子辐射环境探测和电离层电子总含量（TEC, Total Electron Content）遥感探测技术，另外还包括空间天气对电力系统的影响等研究领域；美国国务院下属的空间和先进技术办公室（OES/SAT, Office of Space and Advanced Technology）除了代表美国参加COPUOS的活动，确保美国的空政策以及多边科学活动能够支持美国的外交政策目标和提高美国空间与技术的竞争力，同时还要负责NASA、NOAA以及USGS这些机构之间以及与其他国际空间组织之间的民用空间合作计划；美国地球物理协会（AGU, American Geophysical Union）创办了空间天气杂志，为国际空间天气团体发表最新成果、分享经验以及教育普通大众提供便利；一年一度的空间天气

研讨会（Space Weather Week）和空间天气企业论坛（Space Weather Enterprise Forum）则为来自空间天气业务、研究和用户等各个相关领域的组织机构提供了直接交流的平台，促进了国内和国际空间天气服务水平的提高；美国气象协会（AMS, American Meteorological Society）也通过了空间天气政策声明，确认空间天气对社会不断增长的影响<sup>[5]</sup>。

### 3.2 欧洲

ESA的空间环境和效应分析部（Space Environments and Effects Analysis Section）主持制定了欧洲空间天气计划，在分析执行空间天气计划所能获得的效益后，欧洲确定了以市场为导向来开展空间天气研究和服务，实现空间环境的描述、预报和效应分析的有机结合<sup>[10]</sup>。欧洲空间天气计划发展重点在空间天气监测卫星及相关探测仪器装备、空间天气研究、空间天气预报和服务等方面。

整个欧洲的空间天气计划主要隶属于欧盟和ESA两个机构，其空间天气方面的科研和业务活动分散在欧盟25个成员国和17个成员国之中。图4给出了欧洲空间天气组织的基本框架，欧洲绝大多数空间天气活动都发生在图4中标注DIAS（Digital upper Atmosphere Server），COST 296等字母缩写的各个单元中（COST是Cooperation in Science and Technology的缩写）<sup>[2]</sup>。其中最重要的单元是ESA创立的欧洲空间天气网络（SWENET, Space Weather European Network）。SWENET提供了一种联盟的方式将欧洲的空间天气服务有序的组织起来，目前约有25~30项服务，可提供空间天气方面的数据以及一些数据分析，它的网站是<http://esa-spaceweather.net/swenet/index.html>。SWENET的服务可分为三大类：地面效应、电离层效应和空间飞行器效应。在每一类里面包括多项内容，比如现报、预报以及模拟输出。这些项目一般是由欧洲不同的研究机构开发的。比如由瑞典空间物理研究

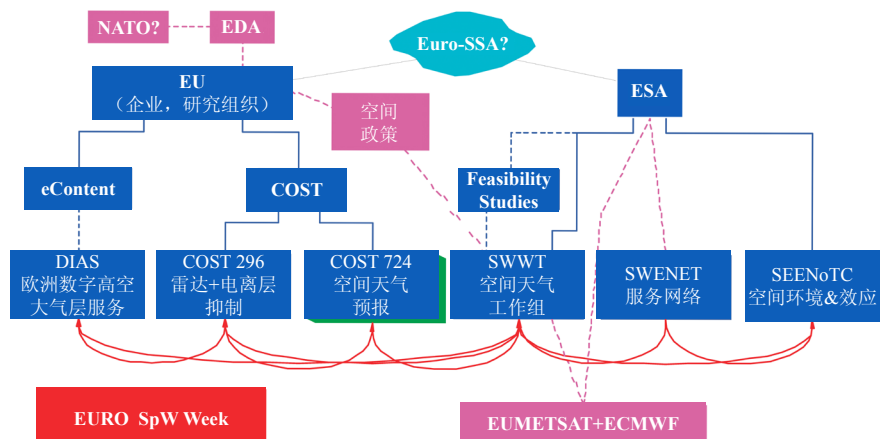


图4 欧洲空间天气基本组织架构<sup>[2]</sup>

所 (Swedish Institute of Space Physics) 开发的地面感生电流 (GIC, Ground Induced Current) 预报, 主要是预测当地的地磁场、地面电场以及地面感生电流每10分钟的变化。由于ESA主要是研发机构, SWENET最终将独立于ESA。而欧洲空间态势感知项目 (SSA, European Space Situational Awareness) 也有着同样的规划。SSA主要目标是发展监测对卫星在轨运行造成危害的物体和事件的能力, 空间天气是其三个主要领域之一, 该项目也力图整合欧洲现有的空间天气监测资源, 包括一些小规模的国家级项目将会整合在SSA框架之下。SSA将来可能会接管SWENET计划, 目前约有10多个国家参与此项目<sup>[2]</sup>。

欧洲在空间天气方面的数据资源是相当有限的, 绝大多数天基探测都是欧空局以及各个国家空间机构支持的科学研究的副产品。例如Proba-2计划中的太阳探测器以及成像系统 (SWAP, Sun Watcher using AP-sensor and Image Processing), STEREO卫星的日球成像仪 (HI, Heliospheric Imagers), 这些仪器可以提供太阳耀斑以及 CME的警报。同时, ESA还在尽可能多的卫星上搭载低成本的空间辐射监测仪 (Space Radiation Monitor)。此外, 欧洲还拥有众多地基观测系统, 包括磁力计、中子监测器、GPS接收机 (用于TEC和闪烁探测) 和电离层垂直测高仪 (用于电子密度廓线和等离子体漂移测量)。

### 3.3 中国

1969年, 中科院在北京、紫金山、云南三个天文台就开始联合做太阳活动预报服务, 但是大规模的空间天气研究始于20世纪90年代中后期。作为国家重大科技基础设施的“东半球空间环境地面综合监测子午链” (“子午工程”) 是世界上最长的子午台链观测, 跨越地球纬度范围达130°, 它利用沿120°E子午线和30°N附近共15个综合性观测台站 (如图5所示), 北起漠河, 经北京、武汉, 南至海南并延伸到南极中山站, 东起上海, 经武汉、成都, 西至拉萨, 运用无线电、地磁 (电)、光学和探空火箭等多种探测手段, 连续监测地球表面到中层大气、电离层和磁层的活动变化, 研究我国120°E子午链附近和30°N纬度链上空的空间环境的区域性特征和全球环境变化之间的关系, 为研究与预测空间天气变化提供地基观测数据。而已经成功实施的地球空间双星探测计划

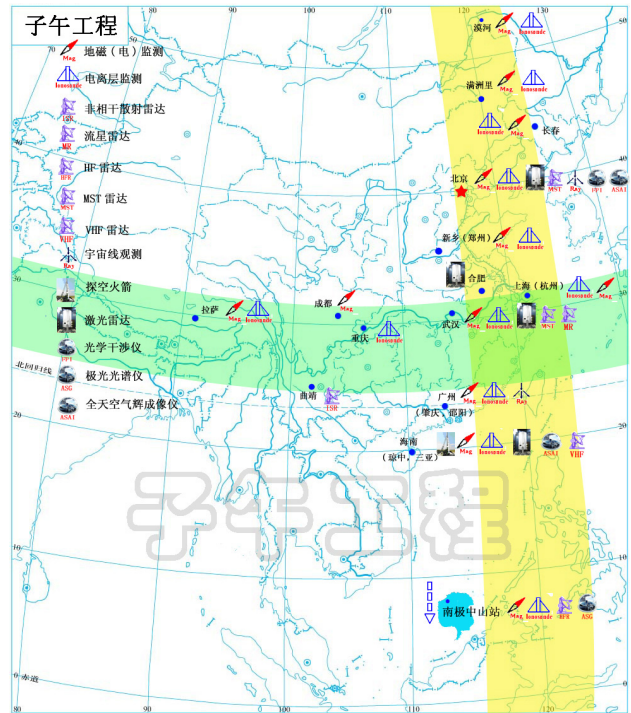


图5 子午工程台站分布图

(2003—2008年), 与ESA的Cluster II星簇形成六点半星座来探测地球磁层空间的多尺度结构, 它也是我国真正意义上的第一个空间科学卫星探测计划。2010年双星探测计划还获得年度国际宇航学院集体成就奖。在空间天气研究方面, 太阳大气磁天气过程、太阳活动、太阳风起源、日冕物质抛射, 行星际扰动传播、磁层能量传输与释放、磁重联过程、中高层大气动力学过程的探测与研究、电离层的建模以及区域异常、地磁、电离层天气预报方法以及极区光学观测研究等一大批研究成果都开始进入国际研究前沿, 这些研究



图6 中国气象局空间天气地基监测台站分布图

也先后获得国家自然科学奖、陈嘉庚地球科学奖、何梁何利奖等国家级奖项，以及COSPAR、ESA、SCOSTEP等多项国际重要奖励<sup>[1]</sup>。

相比而言，我国的空间天气业务起步较晚。中国科学院空间科学与应用研究中心的空间环境预报中心于1999年正式成立，并针对载人航天提供空间环境专项服务。2003年底，中国科学院将其所辖涉及空间天气预报的部门组合成一个非法人机构——中国科学院空间环境预报研究中心。总参气象局等军口单位也在积极推进军事空间天气业务。

目前，空间天气灾害的监测预警已经纳入WMO业务范畴，我国是较早开展空间天气灾害监测预警业务的国家之一，并将空间天气监测预警纳入中国气象局主要业务之一。2002年，国家中编办正式批准在中国气象局成立“国家空间天气监测预警中心”，表明我国的国家级空间天气业务正式开始，主要包括空间天气监测、预报警报和服务等业务；2006年，《国务院关于加快气象事业发展的若干意见》（国发【2006】3号）要求中国气象局加强空间天气监测预警工作；2009年3月，《关于中国气象局机构编制调整的批复》（中央编办复字【2009】45号）批复中国气象局增加空间天气监测预警工作职能；2010年1月，国务院颁布的《气象灾害防御条例》（中华人民共和国国务院令570号）第三十三条规定，各级气象主管机构应当做好太阳风暴、地球空间暴等空间天气灾害的监测、预报和预警工作；2010年，国家发展改革委颁布的《国家气象灾害防御规划（2009—2020年）》的重要任务中要求构建空间天气灾害探测系统。

国家空间天气监测预警中心已经初步构建了国家级空间天气业务体系的主体框架，包括系列化的天基监测平台、网络化的地基监测台站、业务化的预报预测系统、专业化的应用服务机构。在天基监测方面，以风云系列卫星为核心，充分利用现有的风云卫星平台装载空间天气仪器，在地基监测方面，以气象监测与灾害预警工程为基础，结合国内现有的地基探

测站，在“子午工程”的基础上，在关键地点建设一些太阳、电离层和高空大气的台站。目前地基监测已全面稳步铺开，如图6所示。国家空间天气监测预警中心还与美国SWPC共同担任ICTSW的联合主席国，在WMO空间观测系统（GOS, Global Observing System）和WIS框架下共同组织协调空间天气事务。

#### 4 结语

人类社会的发展越来越依赖空间技术，空间天气灾害则是现代化国家必将面对的低概率、高风险的非传统自然灾害。空间天气是一个跨学科的研究领域，所覆盖的学科领域，包括太阳物理、日球物理、磁层物理、电离层物理、大气物理、等离子体物理等多个交叉学科，也包括正在迅速拓展中的与航天、信息、材料、生命和国家安全等领域的跨学科交叉，需要不同领域的科技工作者的共同关注。空间是无国界的第四疆域，空间天气更是一种跨越国界的全球现象，需要国际社会的通力合作，将空间天气惠及一切事、一切人。

#### 参考文献

- [1] 魏奉思, 于晟. 为人类进入空间时代“保驾护航”的科学. 科学时报, 2009-04-24.
- [2] 王劲松, 张效信, 等译. 恶劣空间天气事件——解读其对社会与经济的影响. 北京: 气象出版社, 2011.
- [3] Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research (OFCM). National Space Weather Program Strategic Plan. OFCM Publication FCM-P30-1995, 1995.
- [4] OFCM. National Space Weather Program Implementation Plan, 2d Edition. OFCM Publication FCM-P31-2000, 2000.
- [5] OFCM. The National Space Weather Program: The Strategic Plan. OFCM Publication FCM-P30-2010, 2010.
- [6] 魏奉思. 国际日地能量计划是本世纪90年代人类科学发展史上的一件大事. 中国科学基金, 1989(4): 13-16.
- [7] Withbroe G L, Guhathakurta M, Hoeksema J T. Origins of the International Living With a Star program. Advances in Space Research, 2005, 35(1): 40-43.
- [8] World Meteorological Organization. The Potential Role of WMO in Space Weather. WMO Space Programme, April 2008.
- [9] National Science Foundation. First Large-Scale, Physics-Based Space Weather Model Transitions Into Operation. NSF, Press Release 11-016, 2011.
- [10] Rodgers D J, Murphy L M, Dyer C S. Benefits of a European Space Weather Programme. DERA Report No. DERA/KIS/SPACE/TR000349, ESWPS-DER-TN-0001, Issue 2.1, December 2000. ESA Space Weather Programme Study (ESWPS).
- [11] 魏奉思. 基础研究转型是时代要求. 科学时报, 2011-09-19.

#### 下期要目

- ◆ 大气低频振荡在延伸期预报中的应用进展
- ◆ 城市热岛效应的研究进展
- ◆ “天河一号”系列超级计算机系统
- ◆ 频域滤波和双PRF技术提高新一代天气雷达数据质量
- ◆ GEFA海气相互作用估计方法研究进展
- ◆ 相似离度在北京市道面结冰预报中的初步应用

# 空间天气研究进展

吕建永 杨亚芬 杜丹 周全 毛田

(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 空间天气对人类活动具有深刻的影响, 关系到社会的经济发展和国家安全, 其研究和应用正面临着日益增长的需求。主要从业务和应用的角度, 描述了空间天气所涉及的主要区域内的空间天气现象及空间天气要素近年来国内外的主要研究进展和态势, 以期读者对空间天气有一个整体的认识。

**关键词:** 空间天气, 太阳, 磁层, 辐射带, 电离层, 热层

## Advances in Space Weather Research

Lu Jianyong, Yang Yafen, Du Dan, Zhou Quan, Mao Tian

(National Satellite Meteorological Center / National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Space weather has a great impact on human activities, relevant to the socioeconomic consequences and national security. Space weather research and application is now on the increase. With a view to the space weather operation and application, we present a review of the recent progress in the space weather research, with a specific focus on the main phenomena and elements. It is our hope to provide readers with an overall knowledge of the space weather and its understanding.

**Key words:** space weather, sun, magnetosphere, radiation belt, ionosphere, thermosphere

### 1 引言

空间天气涉及太阳以及太阳风、磁层、电离层和热层中的条件, 这些条件可以影响天基和地基技术系统的正常运行和可靠性, 进而危及人类的生命或健康<sup>[1]</sup>。一次完整的空间天气事件通常具有从太阳表面形成与发展, 然后在行星际空间传播和演化, 最后在地球磁层、电离层和中高层大气产生影响和效应的一般规律。因此, 空间天气的研究和预报需要从太阳(行星际)—磁层—电离层和中高层大气整体上进行。本文参考了国内外的部分文献(如文献[2-4])和美国的*Space Weather*杂志, 主要从空间天气业务和应用的角度, 按空间天气因果链顺序, 简要描述了空间天气所涉及的主要区域内的空间天气现象, 着重回顾了目前空间天气要素的主要国内外研究进展。

### 2 太阳

空间天气扰动的源头主要来自太阳, 是太阳上各种各样的短时间尺度的太阳活动, 以及与之相关的较长时间尺度的太阳输出变化。太阳活动的时间尺度很广, 从著名的11年太阳活动周期, 到27天太阳自转周期, 再到爆发中的亚秒。

现代高技术社会对地球外的扰动正变得越来越脆

弱, 特别是对那些由太阳爆发引起的事件。恶劣空间天气条件主要由耀斑和日冕物质抛射(CME)引起, 其中绝大部分由黑子群或活动区的复杂磁场释放的能量导致。此外, 太阳产生连续的向外流动的等离子体流, 即太阳风, 延伸到外太阳系中。其中源于冕洞的速度大于700km/s的太阳风和太阳能量粒子(SEP)事件对太阳驱动的空间天气尤为重要。

#### 2.1 太阳耀斑

太阳耀斑是太阳大气最大的能量释放现象。耀斑发生时产生的各类辐射是空间天气关注的一个方面。EUV辐射, 尤其是121.6nm波长的Lyman-alpha辐射会被地球大气层吸收, 引起大气层的瞬时加热和膨胀, 可能给运行在低轨道上的地球轨道卫星施加一个外力, 导致其轨道降低<sup>[5]</sup>。目前尚未见到X射线和Gamma辐射对技术系统和人类在太空有直接危害的报道, 有可能是辐射强度太小了。

虽然耀斑的主要能量释放机制来自磁重联已被观测证实<sup>[6-7]</sup>, 但是耀斑的许多问题还没完全解决。空间天气必须预报太阳大气层中下一个耀斑发生的“时间”、“地点”以及“强度”。目前已经知道三个耀斑经常发生的区域: 通量浮现区(例如文献[8], [9])、强剪切区(例如文献[10], [11])和S形或反S形环区(例如文献[12])。但还很难预报耀斑发生的时间。20世纪30年代后期以来, 为了深入研究耀斑性质, 对太阳黑子数据的研究一直比较关注(例如文献[13])。Gallagher等<sup>[14]</sup>通过修改Zurich太阳黑子分类<sup>[15]</sup>, 研发了耀斑幅度预报系统。近年研

收稿日期: 2011年9月1日; 修回日期: 2011年10月23日  
第一作者: 吕建永(1966—), Email: lujy@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(40874087, 41031063);  
公益性行业(气象)科研专项(201106011); 海  
洋公益性行业科研专项经费(201005017)

究发现，每个区域的最大耀斑幅度与太阳黑子面积有关<sup>[16]</sup>。Yamamoto和Sakurai<sup>[17, 18]</sup>研究了X射线耀斑与光球层磁参数之间的关系，发现磁参数与X射线耀斑成线性关系，这一结果有助于预报一个活动区内的最大耀斑。

太阳耀斑的预报方法研究也取得了进展。Miller<sup>[19]</sup>通过分析活动区和太阳黑子的McIntosh分类来预测太阳耀斑发生的可能性。另一个基于McIntosh分类系统的专家系统，THEO，包含了黑子增长、旋转和剪切的信息，以及推测出的磁拓扑结构<sup>[15]</sup>。ARM (Active Region Monitor) 发展为估测某活动区产生C、M或X级耀斑的概率。百分比概率建立在美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 利用22周期期间的McIntosh分类方案分类的区域产生的耀斑数目基础上<sup>[14]</sup>。Colak和Qahwaji<sup>[20]</sup>建立了一套自动化引导系统，即太阳活动自动预报工具 (Automated Solar Activity Prediction)，结合图像处理、机器学习和太阳物理学，在太阳黑子特征的基础上提供太阳耀斑的自动预报。

## 2.2 日冕物质抛射 (CME)

日冕物质抛射 (CME) 是太阳大气中出现的最大规模的快速抛射现象，在日地关系中起着关键的作用。关于CME和耀斑在灾害性空间天气中的地位之争，在“太阳耀斑神话”终结之后，已经证实非重现性磁暴 (包括所有的最强暴) 都是由CME引起的<sup>[21-23]</sup>。

CME撞击地球磁层时，会产生大的地磁暴，进而导致大量对人类技术系统的不利影响，例如电网出现故障和卫星导航失灵。CME的典型速度是每秒几百到

几千千米。等离子体云传播得越快，它所携带的能量就越大，引起地磁暴的可能性就越大。此外，CME越快，可以给出的警报时间就越短。太阳风等离子体一般需要几天时间才能到达地球，但非常快速的CME在20小时之内就可到达地球。

CME最重要的特性就是其对地有效性，即能否到达地球并携带有可产生磁暴的磁场方向。显然，准确确定CME发生的位置、行进的方向以及何时到达地球非常重要。但在CME实际发生之前要预报它是很困难的。目前已清楚的是，具有复杂磁场结构或成熟暗条的活动区很可能会形成CME，但还不能提前预测爆发的时间<sup>[24]</sup>。从预报角度来说，如果探测到一个晕状CME，先要确定爆发的方向。对称的正面晕状CME几乎都是指向地球的。也有报道称约7%的全晕CME不会触到地球<sup>[25]</sup>。所以预报员还必须考虑晕状CME源区在日面的位置。对地CME的源区主要集中在日面中心附近<sup>[26-30]</sup>。源区远离日面中心时可能有部分晕状CME伴生。此时，大多只能观测到行星际激波扫过地球 (例如文献[29])，而观测不到CME，这是由于激波的角度比相应CME要宽<sup>[31]</sup>。这样鞘区的强南向场会产生磁暴。源区离日面中心越远，只遇到激波或完全没有CME相关结构的可能性就越大。值得注意的是，四分之一的正面部分晕状CME不会碰撞到地球<sup>[25]</sup>。

如果是对地CME，就可以预测它到达地球的时间。根据CME速度估算的CME典型传播时间是1~5天。迄今为止，从CME爆发到到达地球的最短时间大约19小时 (2003年10月28日的环状CME)。广角日冕

测试仪LASCO测量的CME速度是天空平面投影速度，与实际传播速度可能有差别，尤其是对于晕状CME。所以，有人进行了传播速度与投影速度关系的经验研究<sup>[32, 33]</sup>。例如，1997年5月12日的一个晕状CME投影速度是250km/s，估算的实际速度大约600km/s，预计5月15日到达地球，WIND飞船在5月15日观测到与此CME相关的激波 (图1)<sup>[3]</sup>。Schwenn等<sup>[25]</sup>考虑了CME膨胀速度 (可测量) 和径向速度之间的关系，提出了一个更先进的预报方法。现在的预报还没考虑CME与周围太阳风流或其它CME相互作用导致的加速或减速作用。

模型方面，CME传播和演化的日球层模型为研究CME的动力学提供了很大的帮助，是解释行星际观测的有用工具。而且，它们扮演了虚拟实验室的

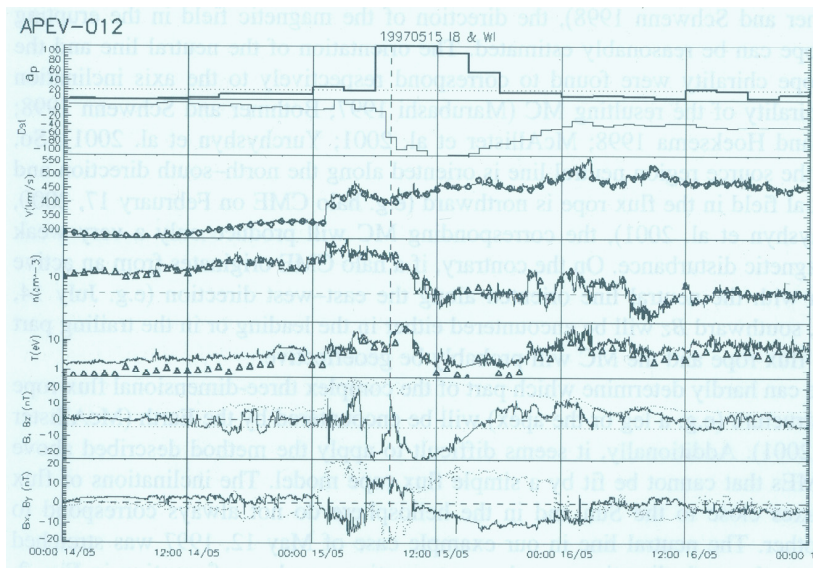


图1 1997年5月15日地磁暴期间太阳风 (WIND卫星) 和地磁数据, 由上往下分别为 $\alpha_p$ 指数; Dst指数; 太阳风速度; 质子数密度; 质子温度; 行星际磁场强度 (虚线) 和其 $B_x$ 分量 (实线); 行星际磁场 $B_y$ 分量 (虚线) 和 $B_y$ 分量 (实线)<sup>[3]</sup>

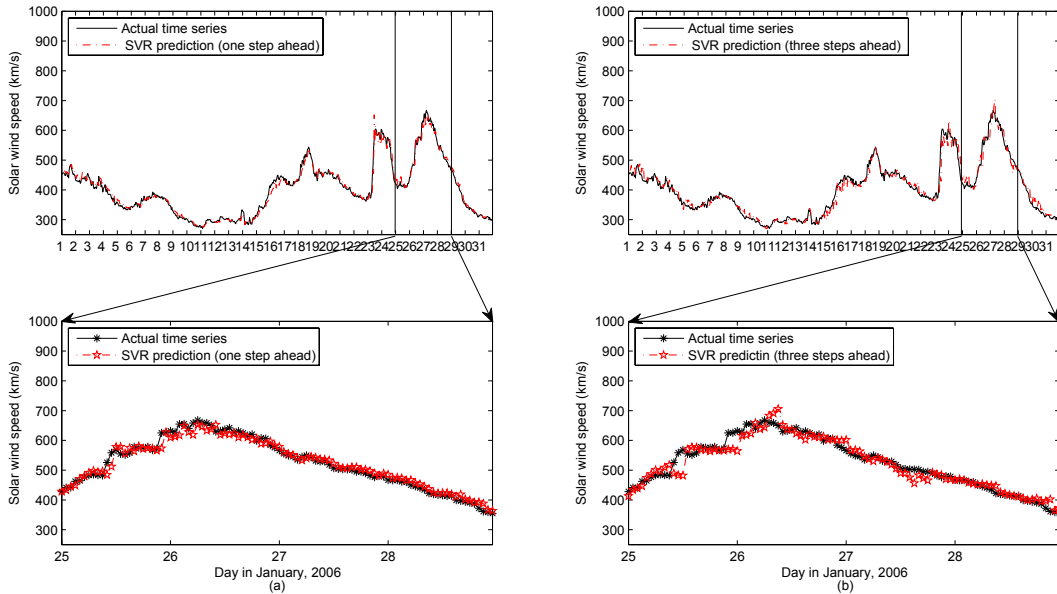


图2 2006年1月太阳风速度实测值和SVR方法预测值对比图（黑色实线为实测值，红色虚线为预测值）

(a) 一步预测的对比图 (b) 三步预测的对比图<sup>[48]</sup>

角色，可用来解释飞船不能顺利到达或者现在还无法到达的太空条件区域<sup>[34]</sup>。

### 2.3 太阳风

太阳风与地球磁场的相互作用对于了解近地空间天气非常重要。太阳风不仅通过动量通量或动压控制着磁腔的大小，而且还通过行星际磁场与地磁场的重联，决定着太阳风的机械能通量耦合进入磁层的能量流。所以对于空间天气应用，研究人员对太阳风速度、质量密度、以及行星际磁场的强度和方向最感兴趣。

在太阳周期最大值的衰退相期间，影响地磁活动的主要太阳现象是冕洞。高速（约750~800 km/s）太阳风不断从冕洞流出<sup>[35, 36]</sup>，如果这些冕洞长期存在（大于27天），高速流将会随太阳自转重复出现，这样就会给人以流与太阳“共转”的印象。如果这些高速流在黄道面附近超过较慢（约300~400 km/s）的流，高速流—慢速流的相互作用会导致交界面处磁场和等离子体的压缩<sup>[37, 38]</sup>。对于磁暴活动，其最重要的行星际特征就是这些强磁场区域，又称“共转相互作用区（CIR）”<sup>[38, 39]</sup>。

高速太阳风含有大幅度的非线性阿尔芬波<sup>[40, 41]</sup>。高速流中阿尔芬波的负行星际磁场 $B_z$ 分量会导致连续的极光区活动，可以持续几天到27天<sup>[42]</sup>。当行星际日冕物质抛射（ICME）主导太阳（地磁）活动时，进入磁层—电离层系统的能量年平均均值比太阳活动极大年还高。作为最重要的空间天气现象之一，相对论电子的加速<sup>[43]</sup>可发生在高速流和高强度持续时间长的连续极光活动期间。但是，加速的具体机制目前还在争论之中。

太阳风速度的预报近年来取得了一些进展。早期，Wang和Sheeley<sup>[44]</sup>利用太阳风速度和磁通量管膨胀因子与太阳风速度的负相关系数建立了一个太阳风速度预报模型。Wintoft和Lundstedt<sup>[45]</sup>结合理论和观测数据，通过太阳磁场观测预报了1AU处的太阳风速度。Robbins等<sup>[46]</sup>通过估计冕洞的位置和尺度开发了与地磁活动相关的太阳风速度预报的经验模型。Luo等<sup>[47]</sup>分析了太阳和日球观测台SOHO/EIT 284Å图像中太阳极紫外辐射爆发时的辐射强度，发现了与太阳系科学卫星ACE探测的3天滞后太阳风速度有很好相关性的一个参数，并用于太阳风速度预报。Liu等<sup>[48]</sup>将一种新的神经网络技术，支持向量回归来预报太阳风速度，其优点是输入只需要几个太阳自转周的太阳风数据就能得到较好的预报效果，同时可以较好的预报冕洞引起的太阳风速度变化（图2）。但是该模型不能预报CME引起的太阳风速度变化。

太阳风的建模也有很多研究进展。随着CPU性能的提高和计算机存储容量的增大，现在的太阳风模型已将观测数据作为边界条件，可以进行接近真实的实时模拟，进行具体事件研究，并将模拟结果与观测作详细的对比。其中，密西根大学的空间环境模拟中心发展了从低太阳日冕到超出地球轨道范围的内日球层的第一个集成模型，可以根据需要将最先进的太阳日冕、太阳风、太阳能量粒子以及磁层、电离层和热层模型集成在一起模拟空间天气的状态<sup>[49, 50]</sup>。Lionello等<sup>[51]</sup>发展了一个太阳日冕和太阳风的三维磁流体学（MHD）模型。在这个模型中，能量方程考虑了沿磁场的热传导、径向损失和加热。Lee等<sup>[52]</sup>将CISM

(Center for Integrated Space Weather Modeling) 内日球层模型拓展到10AU, 以检验这个以太阳磁力计为基础的3D MHD模型模拟太阳风对土星磁层影响的效果。Odstroil等<sup>[53]</sup>也发展了一个耦合数值太阳风模型, 从日冕模型得到太阳风背景, 从日冕仪观测的CME几何和运动学拟合中得到瞬时扰动。

## 2.4 太阳能量粒子 (SEP)

太阳能量粒子又称作太阳宇宙线, 是由太阳偶尔喷发出来的高能粒子, 从“超热粒子”的几个KeV到几个GeV。最快的粒子可以达到超过一半光速还多的速度, 仅仅在耀斑发生后几分钟内就可到达地球。由于它们可以穿透太空探测器的外壳, 降低甚至损坏技术系统的灵敏性, 因而受到特别关注。极端事件发生时, 太阳能量粒子可使极区大气层电离化, 产生硝酸盐, 沉降陷入到地球极地的冰中。冰芯分析发现, 在过去400年中最大的太阳能量粒子事件似乎与1859年Carrington观测到的巨大耀斑有关<sup>[54]</sup>。目前对这类不寻常事件的预报还有困难, 主要因为: (1) 到底用什么参数作为驱动耀斑的标志, 表征耀斑将剧烈爆发及其可能发生的时间、位置和强度; (2) 太阳能量粒子通量的变化, 似乎与耀斑强度只有松散的关系。

根据不同的加速机制, SEP分为两类: 短时间、小尺度的与耀斑相关的脉冲SEP事件, 以及长时间、大尺度的与CME激波相关的缓变SEP事件<sup>[55]</sup>。脉冲和缓变最初来自于相关X射线事件的时间尺度, 但是现在被用于区分太阳高能事件的时间尺度。由于在耀斑

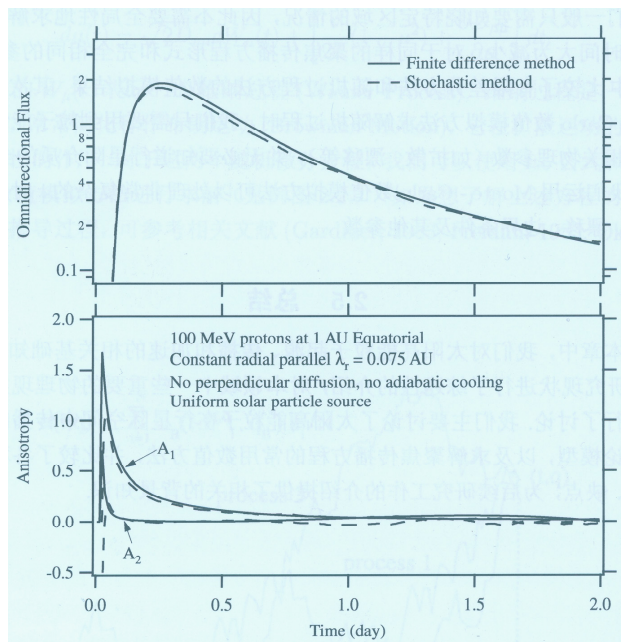


图3 基于聚焦传播方程的SEP各向异性加速计算结果, 随机微分数值模拟和有限差分法解聚焦传播方程的结果相近, 但耗时少得多, A1和A2分别为一阶和二阶各向异性<sup>[57]</sup>

位置处共振的波粒相互作用, 来自耀斑的太阳高能粒子往往在 $3\text{He}/4\text{He}$ 上增长大, 以及增长的重离子含量, 离子通常有非常高的离子化状态。然而, 最强的太阳高能粒子事件(有最高能量)是由CME驱动激波加速引起。激波加速业已成为空间物理和基础等离子体研究中的一个重要课题。近年提出的各向异性加速理论摆脱了传统基于帕克扩散方程的各向同性和粒子注入等问题(如文献[56], [57]), 但目前这一理论尚在发展之中。其中, Zhang等<sup>[57]</sup>发展的快速求解聚焦传播方程的算法与传统的差分相近(图3), 在SEP业务预报中有潜在的应用价值。

SEP在行星际空间的传播是一个悬而未决的空间物理学基础性问题, 也是SEP研究的一个核心问题。其中, SEP的平均自由程是研究SEP传播的一个重要参数, 由SEP自身的物理性质以及太阳风的性质共同决定。为得到SEP的平均自由程, 一般采用数值模拟方法, 但是, 这种方法需要大量的计算资源, 耗时而低效。He和Qin<sup>[58]</sup>提出了一种新的解析方法, 将Shalchi等<sup>[59]</sup>的SEP各向异性时间剖面公式与飞船观测数据进行比对, 进而确定SEP的平均自由程, 并对Shalchi等的SEP各向异性时间剖面公式进行了修正, 得到一个新的解析模型。对于脉冲型SEP事件, 这个新的解析模型可快速给出SEP平均自由程的近似值, 可能在空间天气预报实践中具有一定的应用价值。

当前SEP研究关心的主要问题是: (1) 事件的诊断与加速; (2) 起源和效应; (3) 传播和调制; (4) 加速机制以及激波对SEP的作用。

来自耀斑和CME激波的高能粒子通量主要从两方面影响空间天气: (1) 相对论质子通量会导致对无保护技术系统和宇航员的危险辐射剂量; (2) 能量质子通量碰撞地球中层大气, 引起大气层原子的离子化增强、激发和分离, 会造成极区上空平流层中的臭氧耗竭<sup>[60]</sup>。

## 3 地球空间的辐射环境

地球周围的磁层空间充满大量的高能电子(大于100KeV), 被捕获在 $L=1.2\sim 8$ 的区域, 这就是常说的辐射带。辐射带是太阳—行星际空间与地球磁层、电离层和热层关系链中非常重要的部分, 内辐射带( $1.2<L<2$ )高能电子分布相对稳定, 而外辐射带( $3<L<8$ )电子分布随地磁活动的变化而变化<sup>[61]</sup>。

地球同步轨道的观测表明, 相对论电子通量在磁暴开始后的几天里出现增长, 但是增长的大小和持续时间与Dst、Kp等暴时指标的相关性并不好。另一方面, 20世纪60年代就已经建立了它与太阳风速度的相关性<sup>[62]</sup>。此外, 行星际磁场的方向也是一个影响辐射

带电子通量的重要因素<sup>[62]</sup>。

辐射带在空间天气学中的中心问题之一是辐射带动力学的建模和仿真。理论模型提出诸如径向扩散、波粒相互作用和脉冲激波加速等机制为基本过程。一些更具体的建议有ULF波加热<sup>[63]</sup>、简单扩散和第一绝热不变量守恒引起的加热<sup>[64]</sup>、亚暴加速<sup>[65]</sup>、哨声波模式的混杂波引起的能量扩散<sup>[66]</sup>，等等。目前，现有的机制或过程是否同时作用，以及它们与外部因素是否有本质关系都还不清楚。

观测研究中常常使用从空间一点或多点获得的数据，这样不能严格区分可能的加速过程。由于测量范围不理想，此类研究受到一定的限制<sup>[67]</sup>。为更好地展现磁活动期间实际发生的过程，几个飞船必须在“适当的时间”在“适当的位置”，但是实际上这种情况还是很少见的。为弥补这一不足，需要建立和使用相对论电子和质子加速的全球模型。利用辐射带的物理模型，可以在测量点（特别是在L）之间进行“物理插值”，在考虑了仪器有限的通道数和能量范围后，进行外推。Bourdarie等<sup>[3]</sup>提出和讨论了几种方法，能够在空间任意点任何条件下描述辐射带。但总的来说，虽然辐射带环境的平均条件已被认识，但是磁暴期间的动力学过程还有好多问题没有解决。Bourdarie等<sup>[3]</sup>提出用数据同化技术去克服这些方法的内在局限性。现今数据同化技术非常流行，可以利用模型和实地观测数据的优势。将来需要结合观测和理论模型来提高空间和时间分辨率，制定辐射带时间相关地图，以提高预报的能力，并为进一步的机制研究和原因探索提供分析工具。

带电粒子可与磁层中的波发生共振相互作用，通过投掷角扩散使得辐射带粒子沉降在大气中（例如文献<sup>[68]</sup>）。受到磁层波与辐射带高能电子波粒相互作用的启发，人工ELF/VLF波可改变辐射带电子分布，人工沉降辐射带相对论电子也变得现实起来<sup>[69]</sup>。

## 4 磁层环境

能量、动量和等离子体通过磁层边界处的磁重联和沿边界的粘性相互作用可进入磁层<sup>[70, 71]</sup>。近年来，由太阳风预报地球磁层顶三维位置的模型初步建立<sup>[72, 73]</sup>。当日侧磁层顶发生重联时，能量输入是最有效的。日侧重联发生在行星际磁场南向，与地球磁场平行期间<sup>[74]</sup>，行星际磁场南北向的改变会引起一系列能量装载—损耗过程，即磁层亚暴<sup>[75]</sup>。如果能量输入持续很久（ $\geq 3$ 小时），就会发展为磁暴<sup>[76]</sup>。除了南向行星际磁场/高速太阳风持续几小时会引起磁暴外，磁暴往往也紧随着快速太阳风流、行星际磁云、ICME或其它相关的太阳风结构。亚暴和磁暴发生时常伴有强极光，对地面

技术系统和航天器产生不良影响。

### 4.1 磁暴

磁暴是最大的磁层扰动，与许多空间天气现象有关。磁暴以环绕地球的强电流的形成为基本特征，可持续12小时到几天。磁暴的一般测量方法是Dst指数，它由四个中纬度台站的磁场水平分量的变化得到，具有几十年连续监测的优势。Burton等<sup>[77]</sup>给出了从太阳风速度、密度和行星际磁场的南北分量预报Dst指数的运算法则，可以用来预报强磁暴的Dst特征。地磁指数不仅是表征地磁活动水平的重要指标，也是研究日地耦合过程的重要参数，“地磁活动指数化”的思想正在向其他领域扩展。除了Dst指数以外，常用的地磁活动指数还有K、Kp、Ap等。K指数由Bartels等<sup>[78]</sup>提出，用来描述单个地磁台3小时时段内地磁扰动的强度，通过综合全球选定的13个台站的K指数可得到Kp指数。尽管K/Kp指数在空间天气研究和业务中都得到了广泛应用，但它们其实并不完善。例如磁暴期间，根据这些指数很难充分有效地给出警报，往往会有几十分钟至几小时的延迟。Du等<sup>[79]</sup>根据空间天气业务的需要，设计了一种连续的、线性的、高分辨率（1分钟分辨率）的地磁活动小时幅度rH指数，并给出由单台站地磁数据推导Kp/Ap指数的便捷方法。通过分析1998—2008年期间的磁暴事件，rH指数较之传统的K、Kp、Dst指数具有更快速、更精细地捕捉地磁扰动的特性。

尽管SOHO和ACE的发射推动了空间天气预报的发展，但是要预报磁暴的发生和强度仍然很困难。现在可用的预报技术经常发生错误警报，或者错过了一些超强磁暴。大部分可用的磁暴强度预报方案依赖于磁暴的行星际源，是利用了Burton等<sup>[77]</sup>的原始公式的实时预报方案<sup>[80, 81]</sup>。这些方案可给出大致准确的预报，但事前警告比磁暴实际发生只提前了几个小时，这主要是因为他们的模型对地球附近太阳风的观测有很强的依赖性。例如，在上游L1点的ACE测量可以给出30~60分钟的警告时间。更提前的预警时间需要更上游的太阳风监测<sup>[82]</sup>。实际应用中需要很好地提前预报空间天气，所以要想预防措施到位，还必须能预报：（a）一个CME从太阳抛射不久后磁暴的强度；（b）CME到达地球的时间<sup>[83]</sup>。近年来，出现了许多探讨强磁暴太阳源的研究，以便理解太阳—地球的关系，限于篇幅，这里不容赘述。但这种理解无疑为我们更好地提前预报强/超强磁暴提供了重要的参考。

### 4.2 亚暴

亚暴是空间天气中最普遍的现象之一，往往出现在磁层的夜侧，持续时间为2~3小时，每天发生4~5

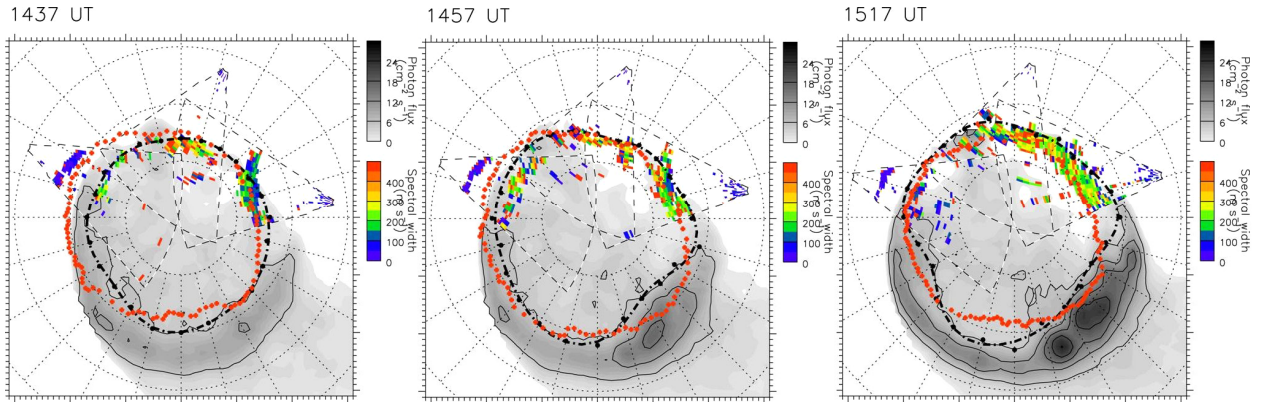


图4 全球磁流体模拟得到的极盖边界(红色点线圆圈)与观测结果(粗黑点线)的对比, 还显示了Polar飞船(灰色尺标是UVI极光亮度)、SuperDARN高频雷达(彩色尺标是其谱宽)以及低地球轨道飞船三个观测点在磁纬(MLT)—磁地方时坐标中的位置, 点线圆代表磁纬600、700和800, 径向点线代表磁地方时(上方是正午)

次, 释放的能量相当于一次中地震。目前有两个主要的亚暴理论: 近地中性线模型<sup>[75]</sup>和电流中断模型<sup>[84]</sup>。在亚暴的观测研究中, 亚暴起始的准确定义和准确定时对研究结果有重要影响<sup>[85]</sup>。Liou等<sup>[86]</sup>曾比较和标定了一些著名的亚暴开始的指标(极区和中纬度磁湾、Pi2微脉动、磁场偶极化和同步轨道高度高能粒子的注入), 并与Polar UVI图像确定的极光突变(auroral breakup)进行了对比。

业已有很多理论来解释单个亚暴的演化, 其中大多集中在引起亚暴发生的不同的、可能的不稳定性上<sup>[87]</sup>。但还没有一个理论可以成功描述或预报亚暴何时会发生。此外, 太阳风驱动的湍动性和亚暴的非线性都很复杂, 使得直接从太阳风测量预报亚暴具有很大的不确定性<sup>[88]</sup>。但亚暴模型必须至少能解释亚暴的发生和它的其他主要特性。早前, Borovsky等<sup>[89]</sup>利用高能电子和质子通量识别出1982年10月1日到1983年9月29日之间的亚暴起始, 分析了亚暴发生的可能分布。后来Freeman等<sup>[90]</sup>发展了一个亚暴期间磁尾全球动力学状态演化的最小模型, 与ACE飞船太阳风数据得到的结果一致, 为亚暴起始的定时和亚暴可能的其它特性分析提供了一个有用的物理描述。

模型方面, 密歇根大学的空间天气集成模型, 在模拟磁层状态方面取得明显进展<sup>[50]</sup>, 例如, 该模型用实时太阳风观测输入得到的极盖边界与观测结果非常相近, 如图4所示。

### 4.3 极光

极光虽然美丽, 但是强烈极光伴同亚暴和磁暴对地面技术系统和航天器均有不良影响。它涉及太阳风—磁层—电离层相互作用而传输能量的过程, 是日地物理研究的重要课题之一。

人们对极光关心的首要问题之一是极光在全球范围内的分布情况。极光卵是极光全球分布的瞬间“快

照”, 它是一个以地磁极为中心的卵圆环, 悬在地球上空。地球几乎全部的磁层都与极光卵紧密地联系在一起, 所以极光卵的位置及其强度可以表征磁层的状态, 确定极光卵的位置及其强度具有重要的科学意义和应用前景。极光卵本身是不断变化的, 随地磁活动水平改变位置<sup>[91]</sup>。白天一侧极光的增亮可能需要太阳风密度和速度的同时增加<sup>[92]</sup>。Helzworth和Meng<sup>[93]</sup>运用曲线拟合的方法给出了一个用Fourier级数表示的极光卵数学模型, 能大致地表示出极光卵随地磁活动的位置, 但是没有考虑极光卵的强度。Carbary<sup>[94]</sup>通过统计Polar UVI几个月的极光图像, 建立了一个以典型的地磁活动指数Kp为基础的简单的极光卵经验模型。根据模型, 给定一个Kp指数, 就可以给出极光卵的大小、范围和强度, 所以这个模型至少可以给出有Kp指数测量开始时的极光形态<sup>[94]</sup>。这个模型在Kp<6时表现得很好, 但是Kp>6就变差了, 这是因为Kp>6时极光卵边界不规则以及统计数据缺乏。人们不仅仅想认识地磁活动与极光卵之间的关系, 还有人通过IMAGE得到的极光图像, 研究了太阳风—磁层耦合作用和环电流与极光卵半径之间的关系, 并且给出了极光卵的峰值边界和峰值强度<sup>[95]</sup>。Yang等<sup>[92]</sup>发现只有当太阳风动压的增强由密度和速度同时增加而引起时, 白天一侧极光的增亮才明显。Chen等<sup>[96]</sup>发现极光强度峰值椭圆的长半轴和短半轴均与ln(AE)线性相关, 开发一套利用AE指数定量描述极光椭圆位形的经验模型。该模型推算得到的极光椭圆与NOAA/SWPC发布的极光椭圆的位置、大小、形态和强度都非常相似, 且两者的相关系数在0.7以上的样本接近95%。

尽管有许多地面和飞船仪器监测极光行为的各个方面, 但是目前还无法明确回答极光卵的位置或它的强度。美国的OVATION项目集中了多个实验室的科学家, 包含了多种数据源, 可以画出从1983年

12月到现在任意时刻的极光卵的大小和位置。美国国家海洋与大气局（NOAA）所属的空间天气预报中心（SWPC）常规发布极光卵位置与极光活动指数大小，便利民间注意当地适宜的晚上可有机会看到极光。加拿大通过CARISMA仪器得到的地面磁力计数据进行极光卵的位置和强度预报。各个国家、科研机构都试图通过各种观测资料和方法来预报极光，而我国在南极有中山站，北极有黄河站，对极光的观测资料越来越多，极光研究越来越引起人们的重视。

#### 4.4 地磁感应电流（GIC）

太阳活动对地面技术系统的效应是空间天气应用和服务的重要内容。其中对地磁环境的效应，特别是地磁传导电流（GIC）和其他地面效应最受关注。地磁效应是在地面上可以观测到的，电离层和磁层电流系统引起的地磁场扰动的直接结果，对人类生活质量、技术系统性能和经济状况都有潜在的影响。与太阳暴有关的辐射增强效应所不同的是，灾害性空间天气的地磁效应对人类健康的直接影响到目前为止还未得到证实。所以，目前人们只关心地磁效应对地面技术系统的影响。

随着高纬长距离电力传输线的引入，GIC已经成为电力部门和网络操作员最关注的问题之一。地磁扰动可影响电网，在地磁扰动之后电力供应停止的许多事例实际上已引起了广泛关注。早在1998年，Boteler等<sup>[97]</sup>就曾列出了十年的事件。Pulkkinen<sup>[3]</sup>讨论了磁场时变（与GIC紧密相关，可作为GIC的一个特征参数）的时空结构，在事件选取时统计分析了磁场波动情况，展望了借此预报GIC的发展策略。电力传输系统中的GIC以复杂的方式依赖于磁场变化的历史、地面电导率分布和电力线网的结构，所以只能在某些范围内可以充当GIC的表征（例如文献[98]）。Boteler<sup>[99]</sup>研究了地磁效应对北美管线的管道土壤势，Weigel<sup>[100]</sup>尝试进行了直接与GIC相关的电磁扰动预报，Trichtchenko等<sup>[101]</sup>利用地磁指数和地磁数据建立了GIC计算模型，并发现利用当地地磁指数来推算GIC要优于全球性地磁指数。Elovaara<sup>[3]</sup>从电力网络的操作者角度讨论过GIC对电力传输线的效应问题，详细分析了电力传输线中与GIC有关的技术问题，并提出了相关地区的缓解策略和相关电网可采用的设备设计方案。可以说GIC现在几乎是电网业界（特别是位于高纬的国家）每天的话题。

空间天气对电力传输网的效应属于设备可能严重受损的技术系统。今后还需要加大努力来定量理解导致大GIC的物理过程并发展出相关算法来预报GIC，进而寻找可行的技术方案，规避极端空间天气

的灾害性后果。应该指出的是，处于高纬度的国家受到的GIC效应最终可以影响到更低纬国家电力供应的稳定性。

## 5 电离层

地球以上60km至1000km之间的区域存在着大量的自由电子，这就是常说的电离层。电离层对太阳活动和地磁暴有着积极的响应。其中，中纬度的电子峰值密度受到太阳活动和地磁活动的强烈调制，高纬在磁暴、亚暴和IMF方向变化时会发生剧烈天气扰动，赤道低纬电离层变化对电动力学现象特别敏感。可以说，在所有的纬度和经度上，电离层都显示出非常复杂的动力学状态确定的天气特征。部分电离层天气过程源于内部，但是大部分过程是由太阳和磁层驱动的<sup>[102]</sup>。电离层天气通常被定义为1小时内的、每小时、每天和每周的变化，对通信和卫星定位以及导航系统的运行有重要的影响。电离层天气的观测、规范和预报是空间天气的关键科学目标之一。

在有关电离层天气及其对通信、卫星定位和导航系统影响的关键领域研究中，下列问题近年来受到特别关注：电子密度峰值（用 $f_0F_2$ 表示）的短期预报、地磁暴对电离层的效应，HF电离层通信和方位寻找系统、电离层天气对卫星导航和精确定位的影响，以及闪烁对卫星运行的效应。

Mikhailov等<sup>[3]</sup>探讨了 $f_0F_2$ 的短期预报和电离层电子密度峰值的测量，用理论和经验相结合的半经验方法，以 $f_0F_2$ 和地球物理学指数关系为基础，讨论了可用指数的效率（图5），该研究中的短期预报是从1到24小时的电离层参数值预报。Buresova等<sup>[3]</sup>利用位于北纬38~70°的台站，分析了欧洲上空电离层对剧烈地磁暴的反应。在F2层，他们关注的是暴效应正负相位的发生频率，并发现目前用IRI暴模型实现再现还有很大困难，也难以预报暴效应的正相或负相。有关地磁暴对电离层F区域不同高度上电子密度的效应研究也引起关注<sup>[3]</sup>。赤道等离子体漂移变化可影响赤道电子密度异常的发展和强度，我国学者在赤道和中低纬电离层模式和数据同化方面进行了大量尝试（例如，文献[103]，[104]），部分在空间天气应用和业务化方面走在了前列。这类研究可能有助于理解电离层中暴效应的状态。

在通信和定位方面，以欧洲为例：Bertel等<sup>[3]</sup>提出了一个用于地地无线电HF（3~30MHz）系统，可用于电离层特征分析、频道模拟、通信以及方向查询等，模型中考虑了极化、Doppler偏移和时间延迟等电离层效应和所用天线类型。Warnant等<sup>[3]</sup>分析了电离层对卫星信号的效应和总电子含量的变化，研究了电

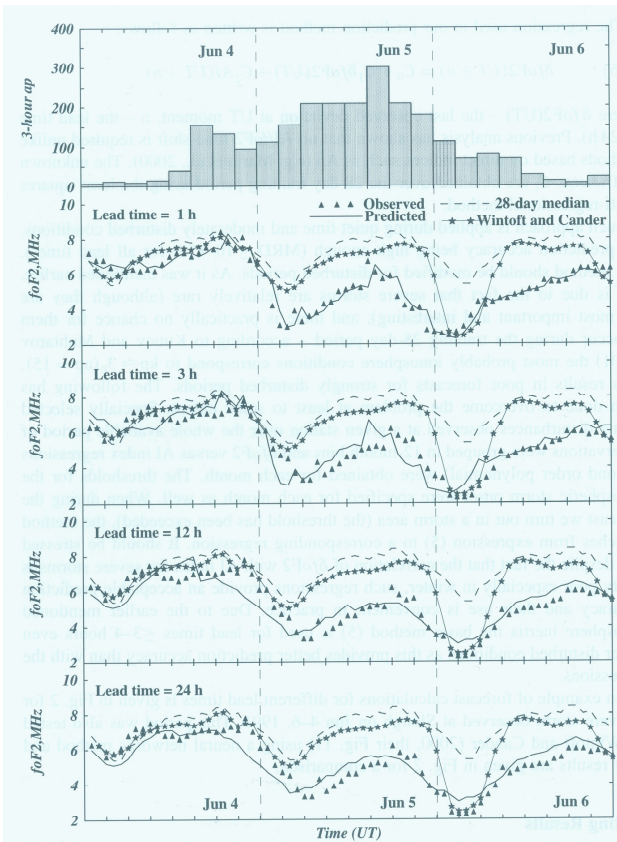


图5 1991年6月4—6日强磁暴期间Slough站 $f_oF_2$ 观测值及不同时间提前量的 $f_oF_2$ 预报值比较,同时给出了滑动28天中值和神经网络滑动预报值<sup>[3]</sup>

离层天气对欧洲的全球导航卫星系统(GNSS)的影响,发现在剧烈地磁暴期间,差分定位主要受高太阳活动期间观测到的总电子含量(TEC)梯度的影响,定位误差在低纬度区域可以达到25m,在中纬度稍小,为6m。此外,精确相对定位受电离层小尺度结构的影响,这些结构引入的误差可以达几分米。非洲近年也实施了静止卫星的信号测量计划,其结果与闪烁模型得到的一致<sup>[3]</sup>。有人提出以闪烁指数值为函数来分析卫星失锁的可能性和定位误差。

模型方面,美国NCAR的热层—电离层电动力学环流模型(TIE-GCM)可用于模拟95~800km之间的热层和电离层过程,电离层数据同化模型和耦合的MIT模型也得到发展<sup>[105]</sup>。

## 6 地球热层、气候系统与太阳的相互作用

虽然现在已经了解了太阳以及地球热层与气候系统的许多相关过程,但是对于它们之间的确切关系以及这些系统的预测目前还不清楚。导致这种情况的原因很多,最主要的是其中的一些重要的物理、化学和生物学机制还不能被有效地量化,甚至有些还不能确定,整个系统在很大的空间尺度与多种时间尺度上存在复杂的相互作用与反馈。

在一个太阳活动周内,波长为200nm的紫外线辐射流量存在7%的变化,这将导致平流层产生显著的变化,特别是臭氧。近年来太阳活动的一些异常表现(如异常长的太阳极小期)和新的太阳周的到来,使关于太阳活动周对气候的影响受到高度关注(参见文献[106])。Stott<sup>[107]</sup>曾指出已有的气候模型可能低估了气候对太阳的响应,Marsh和Svensmark于2003年曾提供过部分证据<sup>[108]</sup>,Zhao等<sup>[109]</sup>最近发现东亚夏季风北界位置对太阳活动的响应可能是中国夏季降水年代际变化的重要原因之一,Haigh和Blackburn<sup>[110]</sup>最近的模式研究结果表明,低平流层热带加热强迫,会使副热带急流和Hadley环流减弱并向极地移动,重力波和行星际波的传播和耗散过程可能是平流层与对流层耦合和相互作用的关键。这些发现说明,在高空区域发生的变化可以影响到地球表面的气候。关于全球气候变化的自然因子贡献,最近的模式研究表明,20世纪上半叶,全球增暖主要归因于自然因素,其中相当程度上源于太阳强迫的增加;而20世纪下半叶和21世纪初,增暖主要由于温室气体排放<sup>[111]</sup>。图6显示了气温变化与太阳活动的关系,其中细红线表示年度全球气温变化,深红线表示11年平均气温变化值;细蓝线表示年度太阳发光总量,深蓝线表示11年平均发光量变化值。不过,关于近几年的欧美严冬与太阳活动周关系的研究结论与上述模拟结果有所不同(例如文献[112]),已引起学者们的关注和争论。

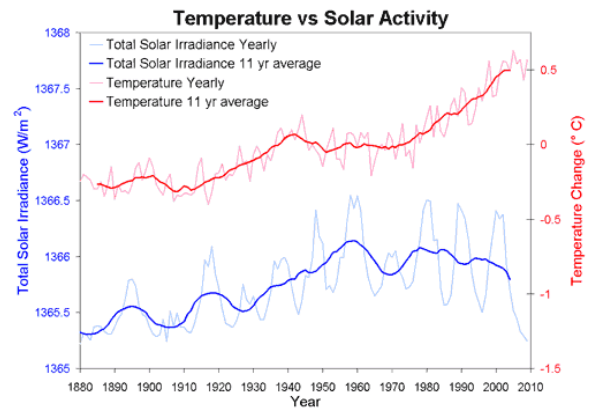


图6 太阳活动与气温变化(来自<http://www.skepticalscience.com/translation.php?a=18&l=14>)

但是要预报空间天气对地球气候的影响目前还不太现实。即使理解了这一系统中的大多数物理定律,但离预测还有很大的距离,特别是空间天气向地球气候能量输入中的空间和时间变化还不能用高效的方法去测量。例如,行星际磁场些微转向就能使太阳风传输到磁层的能量改变两个数量级,磁层顶重联也能产生类似的变化。但即便关于重联在何处发生以及哪些因素控制重联率,这些细节仍然需要努力解决。

可以明确的是,通过磁重联产生的能量大多数最终进入到了热层。在亚暴期间,热层存放了大约 $10^{11}$ 量级的能量,这些能量导致风向和风速的改变。在地磁场静日期间,最大的能量输入(大约 $10^{10}$ 的量级)通过潮汐作用的影响从更低的大气层向上层传输。一次磁暴事件能够使得辐射带中带电子的减小和增大超出磁场强度好几个数量级。但这些能量到底是在何时何地存储的还不能够被预测到。

在某些系统中也许可以安全地忽略一些低幅度、持续时间短的事件,但是在高层大气中这样做是不可靠的。亚暴的电离层—热层特性是与最靠近赤道的极光弧有关的,其特征尺度只有大约1km,这么小尺度的电场可导致局部明显的焦耳加热,而这种现象在磁层极尖区的热层部分相当常见,而且在极光弧附近,电场强度和电离层电导率之间存在复杂的反馈作用(如文献<sup>[13]</sup>)。这些相互作用会改变热层的温度和风速并关系到在低地球轨道卫星上的阻力作用。此外,中性风也能决定F层电离层闪烁在何处被观测到。在考虑高层大气的动力学过程中,中性风的影响常常被忽略,主要是因为它们很难被测量,即便如此也可能在中性风达到1000km/s的时候产生巨大的误差。因此,试着预测全球热层的风速和温度从而确定卫星阻力是相当复杂的工作。值得乐观的是,研究表明与使用了差不多一个世纪的经验方法相比,通过使用卫星自身的阻力测量仪获得更加精确的预测是可能的<sup>[3]</sup>。

Ulich等<sup>[3]</sup>曾回顾了电离层—热层系统长期变化的研究进展及这一研究面临的困难。随着模型变得越来越复杂,对于几分钟到几个世纪时间尺度内变化的建模工作,气象学界已经持续了数十年。在空间天气预报领域的的数据同化方面,工作尚处于起步阶段。

为了预测空间天气对热层的影响与太阳变化对气候系统的影响(并不相近但相关),一些基本的科学问题还需要回答。在太阳—气候科学领域,需要量化已经明了的物理机制,同时在热层、中间层与平流层中以太阳为诱因的对流层顶气候的变化也需要被量化。在热层,尚缺乏能量存储的时间和空间分布信息,而这些信息是精确预测空间天气最大的限制因素。这两个领域也需要将太阳辐射作为一个波长函数进行长期的测量。

## 7 结语

本文主要从空间天气业务和应用的视角,描述了空间天气所涉及的主要区域内的空间天气现象及其国内外主要研究进展。空间天气研究正经历一个前所未有的发展时期,空间天气的预报和应用特性使它不同于传统的空间物理学研究。空间天气是一门应用科

学,更准确地说,是一门由纯科学和应用科学在空间领域交叉定义的使能科学。

空间天气正从描述性研究向预报性研究转变,从定性研究向定量研究转变。为了稳步改进界定和预报天基易损系统运行环境的能力,需要逐步地、系统地提高对太阳—太阳风—磁层—电离层/热层系统因果联系的认识。因此空间天气研究已经成为许多国家空间科学规划的一个支撑。它强调了空间物理学的重要性,并且提供了空间天气为社会贡献的一个途径。

## 参考文献

- [1] 王劲松,吕建永.空间天气.北京:气象出版社,2010.
- [2] Song P, Singer H J, Siscoe G L (Eds.). Space Weather. AGU Geophysical Monograph Series 125, Washington, DC, 2001.
- [3] Jean Lilensten (Eds.). Space Weather: Research towards applications in Europe. Springer, Dordrecht, 2007.
- [4] 王永,魏奉思.中国空间天气研究进展.地球物理学进展,2007,22(4):1025-1029.
- [5] Lean J. Variations in the Sun's radiative output. Rev Geophys, 1991, 29: 505-535.
- [6] Ogawara Y, Takano T, Kato T, et al. The solar-a mission: an overview. Sol Phys, 1991, 136(1): 1-16.
- [7] Domingo V, Fleck B, Poland A I. The SOHO mission: an overview. Sol Phys, 1995, 162: 1-37.
- [8] Zirin H. The 1981 July 26-27 flares--Magnetic developments leading to and following flares. Astrophys J, 1983, 274: 900-909.
- [9] Li H, Sakurai T, Ichimoto K, et al. Magnetic field evolution leading to solar flares. Part I. Cases with low magnetic shear and flux emergence. Publ Astron Soc Jpn, 2000a, 52: 465-481.
- [10] Hagyard M J, Smith J B, Teuber D, et al. A quantitative study relating observed shear in photospheric magnetic fields to repeated flaring. Sol Phys, 1984, 91(1): 115-126.
- [11] Li H, Sakurai T, Ichimoto K, et al. Magnetic field evolution leading to solar flares. Part II. Cases with high magnetic shear and flare-related shear change. Publ Astron Soc Jpn, 2000b, 52: 483-497.
- [12] Canfield R C, Hudson H S, McKenzie D E. Sigmoidal morphology and eruptive solar activity. Geophys Res Lett, 1999, 26: 627-630.
- [13] Giovanelli R G. The relations between eruptions and sunspots. Astrophys J, 1939, 89: 555-567.
- [14] Gallagher P, Moon Y J, Wang H. Active-region monitoring and flare forecasting I. Data processing and first results. Sol Phys, 2002, 209: 171-183.
- [15] McIntosh P S. The classification of sunspot groups. Sol Phys, 1990, 125: 251-267.
- [16] Sammis I F, Tang F, Zirin H. The dependence of large flare occurrence on the magnetic structure of sunspots. Astrophys J, 2000, 540: 583-587.
- [17] Yamamoto T T, Sakurai T. Correlations between flare parameters and magnetic parameters in solar flares. Publ Astron Soc Jpn, 2009a, 61: 75-84.
- [18] Yamamoto T T, Sakurai T. Forecasting maximum solar flare magnitudes from photospheric magnetograms. Space Weather, 2009b, 7, S04007, doi: 10.1029/2008SW000394.
- [19] Miller R W. Wolf—A computer expert system for sunspot classification and solar-flare prediction. J R Astron Soc Can, 1988, 82(4): 191-203.
- [20] Colak T, Qahwaji R. Automated solar activity prediction: A hybrid computer platform using machine learning and solar imaging for automated prediction of solar flares. Space Weather, 2009, 7, S06001, doi: 10.1029/2008SW000401.
- [21] Gosling J T, Bame S J, McComas D J, et al. Coronal mass ejections and large geomagnetic storms. Geophys Res Lett, 1990, 17: 901-904.
- [22] Kahler S W. Solar flare and coronal mass ejections. Ann Rev

- Astron Astrophys, 1992, 30: 113-141.
- [23] Gosling J T. The solar flare myth. *J Geophys Res*, 1993, 98: 18937-18949.
- [24] Zhukov A N. Solar sources of geoeffective CMEs: a SOHO/EIT view. In *Coronal and stellar mass ejections*. (Eds.) Dere K, Wang J, Yan Y, Proceedings IAU Symposium No. 226. Cambridge, Cambridge University Press, 2005.
- [25] Schwenn R, Dal Lago A, Huttunen E, et al. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth. *Ann Geophys*, 2005, 23: 1033-1059.
- [26] Cane H V, Richardson I G, St Cyr O C. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3591-3594.
- [27] Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000. *J Geophys Res*, 2002, 107(A11): 1340-1348.
- [28] Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. IDENTIFICATION of Solar Sources of Major Geomagnetic Storms between 1996 and 2000. *Astrophys J*, 2003, 582: 520-533.
- [29] Manoharan P K, Gopalswamy N, Yashiro S, et al. Influence of coronal mass ejection interaction on propagation of interplanetary shocks. *J Geophys Res*, 2004, 109, A06109.
- [30] Srivastava N, Venkatakrishnan P. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms during 1996-2002. *J Geophys Res*, 2004, 109, A10103.
- [31] Bothmer V, Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind. *Ann Geophys*, 1998, 6: 1-24.
- [32] Gopalswamy N, Lara A, Yashiro S, et al. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2001, 106: 29207-29218.
- [33] Cane H V, Richardson I G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002. *J Geophys Res*, 2003, 80: 4204-4214.
- [34] Riley P, et al. Modeling interplanetary coronal mass ejections. *Pro IAU Symposium*, 2005, 226, CUP: 389-402.
- [35] Krieger A S, Timothy A F, Roelof E C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Solar Phys*, 1973, 29: 505-525.
- [36] McComas D J, Elliott H A, Gosling J T, et al. Ulysses second fast latitude scan; complexity near solar maximum and the reformation of polar coronal holes. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(9): 1290-1293.
- [37] Pizzo V J. Interplanetary shocks on the large scale: A retrospective on the last decade's theoretical efforts. In *Collisionless shocks in the heliosphere: reviews of current research*. *Geophys Monogr Ser*, 35, edited by Tsurutani B T, Stone R G, AGU, Washington, DC, 1985.
- [38] Balogh A, Gosling J T, Jokipii J R, et al. (eds.) Corotating interaction regions. *Space Sci Rev*, 1999, 89: 141-411.
- [39] Smith E J, Wolf J H. Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneer 10 and 11. *Geophys Res Lett*, 1976, 3: 137-140.
- [40] Tsurutani B T, Ho C M, Smith E J, et al. The relationship between interplanetary discontinuities and Alfvén waves: Ulysses observations. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 2267.
- [41] Balogh A E, Smith E J, Tsurutani B T, et al. The heliospheric magnetic field over the south polar region of the sun. *Science*, 1995, 268: 1007.
- [42] Tsurutani B T, Gonzalez W D. The cause of high intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains. *Planet Space Sci*, 1987, 35: 405.
- [43] Baker D N, Blake J B, Klebesadel R W, et al. Highly relativistic electrons in the Earth's outer magnetosphere: 1. Life-times and temporal history 1979-1984. *J Geophys Res*, 1986, 91: 4265-4276.
- [44] Wang Y M, Sheeley N R J. On potential field models of the solar corona. *Astrophys J*, 1992, 392(1): 310-319.
- [45] Wintoft P, Lundstedt H. Prediction of daily average solar wind velocity from solar magnetic field observations using hybrid intelligent systems. *Phys Chem Earth*, 1997, 22(7-8): 617-622.
- [46] Robbins S, Henney C J, Harvey J W. Solar wind forecasting with coronal holes. *Solar Physics*, 2006, 233(2): 265-276.
- [47] Luo B, Zhong Q, Liu S, Gong J. A new forecasting index for solar wind velocity based on EIT 284Å observations. *Solar Physics*, 2008, 250(1): 159-170.
- [48] Liu D D, Huang C, Lu J Y, Wang J S. The hourly average solar wind velocity prediction based on support vector regression method. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 413(4): 2877-2882.
- [49] Gombosi T I, Powell K G, De Zeeuw D L, et al. Solution-adaptive magnetohydrodynamics for space plasma: Sun-to-Earth simulations. *Comp in Sc & Eng*, 2004, 6(2): 14-35.
- [50] Tóth G, Volberg O, Ridley A J, et al. A physics-based software framework for sun-earth connection modeling. In: Lui A T Y, Kamide Y, Consolini G (eds.) *Multiscale Coupling of Sun-Earth Processes*, Elsevier, Amsterdam, 2005.
- [51] Lionello R, Linker J A, Mikic Z. *AIP Conf Proc* 679: Solar Wind Ten, 2003: 222-225.
- [52] Lee C O, Ledvina S A, Luhmann J G, et al. AGU Fall Meet Abstr, 2004: A1418.
- [53] Odstrcil D, Riley P, Zhao X P. Numerical simulation of the 12 May 1997 interplanetary CME event. *J Geophys Res*, 2004, 109, A02116.
- [54] Reames D V. Solar energetic particle variations. *Adv Space Res*, 2004, 34: 381-390.
- [55] Cliver E W, Cane H V. Gradual and impulsive solar energetic particle events. *Eos Trans AGU*, 2002, 83: 61-68.
- [56] Le Roux J A, Webb G M. Nonlinear cosmic-ray diffusive transport in combined two-dimensional and slab magnetohydrodynamic turbulence: A BGK-Boltzmann approach. *Astrophys J*, 2007, 667: 930-955.
- [57] Zhang M, Qin G, Rassoul H. Propagation of solar energetic particles in three-dimensional interplanetary magnetic fields. *Astrophys J*, 2009, 692: 109-132.
- [58] He H Q, Qin G. A Simple Analytical Method to Determine Solar Energetic Particles' Mean Free Path. *The Astrophysical Journal*, 730: 46, doi:10.1088/0004-637X/730/1/46.
- [59] Shalchi A, Skoda T, Tautz R C, Schlickeiser R. Analytical description of nonlinear cosmic ray scattering: isotropic and quasilinear regimes of pitch-angle diffusion. *A&A*, 2009, 507: 589-597.
- [60] Rohen G, von Savigny C, Sinnhuber M, et al. Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY. *J Geophys Res*, 2005, 110, A09S39.
- [61] Thorne R M, Shprits Y Y, Meredith N P, et al. Refilling of the slot region between the inner and outer electron radiation belts during geomagnetic storms. *J Geophys Res*, 2007, 112, A06203, doi: 10.1029/2006JA012176.
- [62] Blake J B, Baker D N, Turner N, et al. Correlation of changes in the outer-zone relativistic-electron population with upstream solar wind and magnetic field measurements. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 927-929.
- [63] Liu W W, Rostoker G, Baker D. Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ulf pulsations. *J Geophys Res*, 1999, 104(17): 17391-17407.
- [64] Hilmer R V, Ginet G P, Cayton T E. Enhancement of equatorial energetic electron fluxes near L = 4.2 as a result of high speed solar wind streams. *J Geophys Res*, 2000, 105(23): 23311-23322.
- [65] Ingraham J C, Belian R D, Cayton T E, et al. Substorm injection of relativistic electrons to geosynchronous orbit during magnetic storms: A comparison of the march, 24, 1999 and march 10, 1998 storms. Poster, GEM workshop, Snowmass, 19-23 June 2000.
- [66] Horne R B, Thorne R M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 3011.
- [67] Friedel R H W, et al. A multi-spacecraft synthesis of relativistic electrons in the inner magnetosphere using LANL, GOES, GPS, SAMPEX, HEO and POLAR. *Rad Meas Jour*, 1999, 18: 589-597.
- [68] Gannon J L, Li X, Heynderickx D. Pitch angle distribution analysis of radiation belt electrons based on Combined Release and Radiation Effects Satellite Medium Electrons A data. *J Geophys Res*, 2007, 112, A05212, doi: 10.1029/2005JA011565.
- [69] Inan U S, Bell T F, Bortnik J. Controlled precipitation of

- radiation belt electrons. *J Geophys Res*, 2003, 108(A5), 1186, doi: 10.1029/2002JA009580.
- [70] Dungey J W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys Rev Lett*, 1961, 6: 47-48.
- [71] Axford W I, Hines C O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms. *Can J Phys*, 1961, 39: 1433.
- [72] Lin R L, Zhang X X, Liu S Q, et al. A three-dimensional asymmetric magnetopause model. *J Geophys Res*, 2010, 115, A04207, doi: 10.1029/2009JA014235.
- [73] Lu J Y, Liu Z-Q, Kabin K, Zhao M X, et al. Three dimensional shape of the magnetopause: Global MHD results. *J Geophys Res*, 2011, 116, A09237, doi: 10.1029/2010JA016418.
- [74] Akasofu S I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci Rev*, 1981, 28: 121-190.
- [75] Baker D N, Pulkkinen T I, Angelopoulos V, et al. The neutral line model of substorms: Past results and present view. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12975-13010.
- [76] Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J Geophys Res*, 1994, 99: 5771-5792.
- [77] Burton R K, McPherron R L, Russell C T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *J Geophys Res*, 1975, 80(31): 4204-4214.
- [78] Bartels J, Heck N H, Johnston H F. The three - hour range index measuring geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 1939, 44: 411-454.
- [79] Du D, Xu W Y, Zhao M X, Chen B, Lu J Y, Yang G L. A sensitive geomagnetic activity index for space weather operation. *Space Weather*, 2010, 8, S12006, doi:10.1029/2010SW000609.
- [80] Wu J G, Lundstedt H. Prediction of geomagnetic storms from solar wind data using Elman recurrent neural networks. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 319-322.
- [81] O'Brien T P, McPherron R L. An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay. *J Geophys Res*, 2000, 105: 7707-7720.
- [82] McPherron R L, Siscoe G, Arge N. Probabilistic forecasting of the 3h ap index. *IEEE transactions on Plasma Science*, 2004, 32: 1425-1438.
- [83] Feynman J, Gabriel S B. On space weather consequences and predictions. *J Geophys Res*, 2000, 105: 10543-10564.
- [84] Lui A T Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *J Geophys Res*, 1996, 101: 13067-13088.
- [85] Mende S B, Angelopoulos V, Frey H U, et al. Determination of substorm onset timing and location using the THEMIS ground based observatories. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L17108.
- [86] Liou K, Meng C I, Lui A T Y, et al. On relative timing in substorm onset signatures. *J Geophys Res*, 1999, 104: 22807-22817.
- [87] Fairfield D H. Advances in magnetospheric storm and substorm research: 1989-1991. *J Geophys Res*, 1992, 97, 10865.
- [88] Freeman M P, Farrugia C J. Solar wind input between substorm onsets during and after the October 18-20, 1995, magnetic cloud. *J Geophys Res*, 1999, 104, 22729.
- [89] Borovsky J E, Nemzek R J, Belian R D. The occurrence rate of magnetospheric-substorm onsets: Random and periodic substorms. *J Geophys Res*, 1993, 98, 3807.
- [90] Freeman M P, Morley S K. A minima substorm model that explains the observed statistical distribution of times between substorms. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L12807.
- [91] Feldstein Y I, Starkov G V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances. *Planet Space Sci*, 1967, 15: 209-229.
- [92] Yang, Y F, Lu J Y, Wang J S, Peng Z, et al. Different response of dayside auroras to increases in solar wind dynamic pressure. *J Geophys Res*, 2011, 116, A08314, doi:10.1029/2010JA016385.
- [93] Holzworth R H, Meng C I. Mathematical representation of the auroral oval. *Geophys Res Lett*, 1975, 2(9): 377-380.
- [94] Carbary J F. A Kp-based model of auroral boundaries. *Space Weather*, 2005, 3, S10001, doi:10.1029/2005SW000162.
- [95] Milan S E. Both solar wind-magnetosphere coupling and ring current intensity control of the size of the auroral oval. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L18108, doi:10.1029/2009GL039997.
- [96] Chen A Q, Li J W, Yang G L, Wang J S. Calculating Auroral Oval Pattern by AE Index. *Acta Meteor Sinica*, 2008, 22: 91-96.
- [97] Boteler D H, Pirjola R P, Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth's surface. *Adv Space Res*, 1998, 22: 17-27.
- [98] Pulkkinen A. Geomagnetic induction during highly disturbed space weather conditions: Studies of ground effects. PhD thesis, Finnish Meteorological Institute, 2003.
- [99] Boteler D H. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline. *Advances in Space Research*, 2000, 26(1): 15-20.
- [100] Weigel R S, Klimas A J, Vassiliadis D. Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic fields and their time derivatives. *J Geophys Res*, 2003, 108(A7), 1298, doi: 10.1029/2002JA009627.
- [101] Trichtchenko L, Boteler D H. Modeling Geomagnetically Induced Currents Using Geomagnetic Indices and Data. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(4): 1459-1467.
- [102] Rishbeth H, Mendillo M. Patterns of ionospheric variability. *J Atm Sol-Ter Phys*, 2001, 63: 1661-1680.
- [103] Yue X, Wan W, Lei J, Liu L. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L05014, doi:10.1029/2007GL033051.
- [104] Liu L, Zhao B, Wan W, Venkatraman S, Zhang M, Yue X. Yearly variations of global plasma densities in the topside ionosphere at middle and low latitudes. *J Geophys Res*, 2007, 112, A07303, doi:10.1029/2007JA012283.
- [105] Wang W, Lei J, Burns A G, et al. Ionospheric electric field variations during a geomagnetic storm simulated by a coupled magnetosphere ionosphere thermosphere (CMIT) model. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L18105, doi: 10.1029/2008GL035155.
- [106] 赵亮, 徐影, 王劲松, 丁一汇, 肖子牛. 太阳活动对近代气候变化的影响研究进展. *气象科技进展*, 2011, 1(4): 37-48.
- [107] Stott Peter A, Jones Gareth S, Mitchell John F B. Do models underestimate the solar contribution to recent climate change? *J Climate*, 2003, 16: 4079-4093.
- [108] Marsh N, Svensmark H. Solar influence on Earth's climate. *Space Science Reviews*, 2003, 107(1-2): 317-325.
- [109] Zhao L, Wang J S, Zhao H J. Signature of the solar cycle on decadal variability in monsoon precipitation over China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90(1), in press.
- [110] Haigh J D, Blackburn M. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. *Space Sci Rev*, 2006, 125: 331-344.
- [111] Meehl G A, Washington W M, Amman C M, et al. Combinations of natural and anthropogenic forcings and 20th century climate. *J Clim*, 2004, 17: 3721-3727.
- [112] Ineson S, Scaife A A, Knight J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geosci*, 2011, doi:10.1038/ngeo1282.
- [113] Lu J Y, Wang W, Rankin R, et al. Electromagnetic waves generated by ionospheric feedback instability. *J Geophys Res*, 2008, 113, A05206, doi: 10.1029/2007JA012659.

# 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展

赵亮<sup>1</sup> 徐影<sup>2</sup> 王劲松<sup>1</sup> 丁一汇<sup>2</sup> 肖子牛<sup>3</sup>

(1 国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081; 3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 主要参阅了近十年来的有关文献, 回顾和总结了太阳活动对近百年气候变化影响的研究进展。首先, 回顾了太阳活动对全球和区域尺度的温度、季风和降水影响的最新观测证据和模拟结果; 其次, 从北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、ENSO、准两年振荡(QBO)等方面总结了太阳活动对各气候模态的可能影响; 然后归纳了太阳活动影响气候变化的三种可能机制(太阳总辐射机制、太阳短波辐射变化机制和能量粒子机制)的研究进展。最后提出了该领域一些重要而未解决的科学问题, 对未来的研究提出了一些展望, 并简要阐述了太阳—气候研究这一交叉学科的重要意义。

**关键词:** 太阳活动, 气候变化, 太阳总辐射, 紫外辐射, 银河宇宙射线

## Progress in Studies on the Influence of Solar Activity on Climate Change during the Last 100 Years

Zhao Liang<sup>1</sup>, Xu Ying<sup>2</sup>, Wang Jingsong<sup>1</sup>, Ding Yihui<sup>2</sup>, Xiao Ziniu<sup>3</sup>

(1 National Satellite Meteorological Center /National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 CMA Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Progress in studies for the last decade on the relationship between solar activity and decadal climate change, is reviewed. First, recent observations and simulations for the influences of solar activity on the global and regional temperature, monsoon and precipitation, and the regional climatic modes including the Atlantic Oscillation (AO), the North Atlantic Oscillation (NAO), ENSO, and the Quasi Biennial Oscillation (QBO) are reviewed and summarized. Second, three mechanisms proposed to explain these climate observations are described, including the effects of variations in total solar irradiance, ultraviolet radiation and energetic particles. Finally, we have presented some important and unsolved problems for future research.

**Key words:** solar activity, climate change, total solar radiation, UV radiation, galactic cosmic rays

### 1 引言

新太阳活动周(第24太阳周)已经到来, 并可能将在2013—2014年前后到达新的最强期, 这段时间太阳活动将日趋活跃, 空间天气事件将日渐频繁。这可能提供给科学界一个重要机会: 分离源于太阳和人类的气候效应<sup>[1]</sup>。另一方面, 近年来太阳活动的一些异常表现(如异常长的太阳极小期)暗示其内部可能已发生了某种未知的变化, 同时也预示1920年以来的强太阳活动期(现代极大期)可能即将或已经结束<sup>[2]</sup>, 这究竟会不会对未来地球环境和气候产生影响, 已引起科学家的高度关注和警觉。

太阳作为离地球最近的恒星, 向地球提供着光和热, 是地球气候系统最基本的能量源, 同时, 它也是空间天气扰动的主要源头<sup>[3]</sup>。46亿年来, 其长期变化对地球气候的形成和演变有着重要影响, 这一点已有

广泛共识, 但在百年和十年这样相对较短的时间尺度上, 对气候的影响, 尤其对近一百年来气候变暖的影响和贡献如何, 却一直存在争议<sup>[4-7]</sup>, 然而, 没有争议的问题常常会趋向于被边缘化, 存有争议往往说明其具有研究价值。自从1801年, Herschel<sup>[8]</sup>首先研究并发现了太阳黑子与降雨的关系间接支配着伦敦小麦价格以来的200年间, 尽管困难重重, 但科学家们始终坚持不懈地探索着太阳活动等空间天气事件影响地球天气气候的确凿证据和令人信服的机制(可参见文献<sup>[9, 10]</sup>), 这主要是因为这方面的研究成果不仅有利于深入理解和认识日地关系和气候变化规律, 更有助于发展气候预测, 甚至天气预报的新方法。

在刚过去的第23太阳周(1996—2008年)和刚开始的第24太阳周(2009—)的十多年里, 随着人类空间探测水平的提高和大量相关研究的深入进行, 国内外在太阳—气候方面的研究取得了许多重要进展。本文主要针对太阳活动对近百年气候变化影响的近十年研究成果进行梳理和总结, 对前沿和争议问题进行归纳和讨论, 并在此基础上对未来的发展方向提出一些展望。

收稿日期: 2011年10月10日; 修回日期: 2011年11月13日

第一作者: 赵亮(1978—), Email: zhaol@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金(40931056, 40875083); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950102); (中-英-瑞)“中国适应气候变化项目—气候科学”

## 2 太阳活动对气候变化的影响——观测事实

自19世纪法国科学家Claude Pouillet和英国科学家John Herschel应用各自的测量装置测得太阳常数数值后,对太阳辐射和太阳活动对地球大气的影响逐渐成为多种学科交叉的重要研究领域。

### 2.1 温度

目前,全球气候变暖是国内外研究的热点问题,也是具有争议的问题,尤其是关于气候变暖的原因<sup>[7]</sup>。争议的存在是因为现在人们对某些气候强迫因子的认知水平还不够,太阳活动就是其中之一。

#### 2.1.1 全球尺度

从全球尺度来看,随着新的探测手段的出现,人们发现在一个太阳黑子周期相位内,地球接受的太阳总辐射量(TSI)变化仅约千分之一,一些学者认为,它最可能导致0.1℃的地球表面气温变化<sup>[11, 12]</sup>,这相对于百年来(1906—2005年)0.74℃的增暖<sup>[13]</sup>而言,小了许多。但许多其他太阳参数和太阳活动具有明显的周期性变化和更大的变率,其与气温的关系是值得深入研究的。最近, Tung和Camp<sup>[14]</sup>发现,去趋势化的全球年平均表面气温的年际变化与太阳周期呈正相关(相关系数0.48),达到95%以上的信度水平(如图1);另一方面,他们利用不同来源的再分析数据,获得了与太阳活动有关的全球增暖空间型,其大约有0.2K的变化幅度,且高纬比低纬强,陆面比海洋强。信号分离是这方面研究的关键, Ramaswamy等<sup>[15]</sup>发现,尽管地球表面对太阳和温室气体强迫的响应是相似的,但平流层和对流层对温室气体的响应是相反的,这对从噪音中分离太阳信号是有益的。

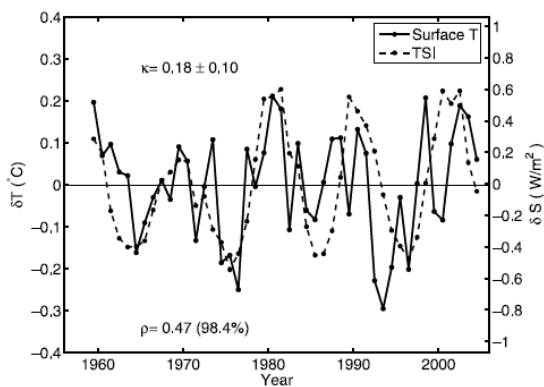


图1 全球年平均NCEP表面气温(实线)和年平均太阳总辐射度(TSI)时间序列。 $\kappa$ 是太阳常数每变化 $1\text{W}/\text{m}^2$ 全球平均温度响应的回归值( $\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ), $\rho$ 是两者的相关系数,括号中值为信度水平<sup>[14]</sup>

#### 2.1.2 区域尺度

从区域的角度来看,学者们从全球不同地区和不同高度检测出太阳周期信号。例如,有学者指出,蒙德极小期欧洲的气候变率可能与外部强迫如太阳辐

射有关<sup>[16]</sup>。Raspopov等<sup>[17]</sup>利用实测温度记录和欧亚高纬地区的树轮序列初步证实了欧亚高纬气候系统可能存在类似太阳活动周期的准90、准22和准11年周期。Mendoza等<sup>[18]</sup>分析了墨西哥中部在1920—1990年的温度变化情况,发现温度变化不仅与地磁场存在相关性,而且与太阳黑子数、太阳磁周期、宇宙线流量均具有相似的周期。Alvarez等<sup>[19]</sup>研究了1889—1991年间热带哈瓦那地区的平均温度和太阳周期长度之间的关系,发现它们之间存在很强的相关性。在东亚,Soon等<sup>[20]</sup>用多种实测和再分析资料确认了20世纪中国陆面气温与太阳辐射存在不容忽视的关系。近些年,许多学者将注意力放到整个对流层及其之上的大气辐射和环境变化上,例如曲维政等<sup>[21]</sup>发现南半球大气温度场从地面层直至对流层顶广泛盛行与太阳磁场磁性22年周期变化相一致的变化周期;太阳磁场22年周期变化对对流层大气高层的影响比低层影响大,对平流层影响更大,而太阳活动11年周期对地面层大气气候影响最明显,对对流层中上层影响较弱。最近需要特别关注的是有关欧美严冬与太阳活动周关系的研究,Rutgers大学全球积雪实验室曾确认2010年第7周北半球雪盖面积达44年来第二高,英国中部2010年12月是近350年以来第二冷的12月,且出现了连续3年的冷冬,这一现象非常罕见<sup>[22]</sup>。Ineson等<sup>[23]</sup>根据最新的卫星光谱辐射监测仪探测到的最近(2004年至今)太阳紫外辐射变化结果——此太阳活动下降期紫外辐射下降幅度比之前的研究结果大4~6倍(详见3.2节),将这一强迫首次应用到一个完整的海洋—对流层—平流层—中间层气候模式中,发现在这样的低太阳活动期冬季,作为对太阳紫外辐射减少而导致的臭氧加热减少的响应,热带平流层上空形成强的冷空气,伴随同期中纬度平流层高层东风异常逐渐发展并向极地向下传播,使近地面气压和气温形成类似北大西洋涛动(NAO)或北极涛动(AO)的负位相特征,导致北欧和美国出现严冬,南欧和加拿大出现温暖冬季,并认为此过程中行星波的传播是导致东风异常传播和扩大的原因。这一结果与Lockwood等<sup>[24]</sup>和Woollings等<sup>[25]</sup>的结论基本一致。最近的欧美严冬是否真的与太阳活动有关,可能会在未来几年新太阳峰年到来时得到检验。

在海温方面,White等<sup>[26]</sup>在研究太平洋、大西洋和印度洋海表温度(SST)时,利用两种独立的SST数据,检测出滞后于太阳活动1~2年的海洋温度变化,其中每一个大洋的SST变化或全球海洋平均SST变化,在数十年至数百年尺度上,其相位与太阳黑子11年周期变化近似一致,温度变化的量级与太阳总

辐射11年变化的量级也相当。但后来White等<sup>[27]</sup>又证实,全球上层海洋年代际尺度的增暖,并不是由于太阳辐射强迫直接引起的。关于ENSO与太阳活动的关系,详见2.3.3。

对于太阳强迫和人类强迫对温度影响的相对重要性方面,Lean等<sup>[28]</sup>曾经在1995年利用重建的太阳辐射资料,分析得出太阳强迫可能贡献了1860年以来0.55℃的全球增暖的一半。最近的模式研究结果表明,20世纪上半叶,全球增暖主要归因于自然因素,其中相当程度上源于太阳强迫的增加;而20世纪下半叶和21世纪初,增暖主要由于温室气体排放<sup>[13, 29, 30]</sup>。而对于最近20年的情景,有的研究认为,太阳强迫可能对气候起到一个弱的降温作用<sup>[31]</sup>。

## 2.2 季风和降水

相对于气温而言,降水的空间变率更大,这对于捕捉气候系统中的太阳周期信号可能是有利的。另一方面,由于直接影响降水的因子一般是一些天气气候系统,例如季风,这对于揭示太阳影响气候的物理机制也是有利的。最近有一些研究正是从这一点出发,得到了一些有益的结果<sup>[32-34]</sup>。

### 2.2.1 全球尺度

在年代际尺度上,较早的关于全球陆面降水分布的研究结论,大致是:在太阳黑子峰年,赤道低纬地区雨量较多,中纬度(20~40°)较少,40°以上又重新偏多<sup>[35]</sup>。最近的有关研究与之前的结论有所不同,Meehl等<sup>[36]</sup>的研究显示,11个太阳峰年合成的异常SST分布更接近ENSO冷事件(La Niña),与之匹配的全球(陆面和海洋)降水异常型是热带太平洋地区降水偏少,其南北两侧降水偏多,这种降水型与同纬度的陆面降水有很大差别,不过由于他们使用的观测降水样本只有3个太阳峰年,海洋降水资料也比较匮乏,所以其结果还有待确认。

关于太阳活动在众多的降水强迫因子中的相对重要性,Currie曾进行了一系列工作(例如文献[37-39]等),他利用全球各大洲不同的气温、降水、树轮等资料,采用最大熵谱等方法,在多种要素中检测出了太阳和月亮周期信号,并计算了方差贡献,认为总体上太阳活动对降水的影响小于月球潮汐的影响,但在年代际尺度上是重要的。Lambert<sup>[40]</sup>使用最优指纹法,通过比较实测降水与短波、长波强迫因子时间序列,发现多数降水的变率更接近于受自然短波强迫驱动,而非人类有关的长波强迫。Wasko和Sharma<sup>[41]</sup>也发现全球大气水分含量有一个明显的接近太阳周期的11年小波谱峰。季风降水的长期变率可能是季风对太阳强迫或其他强迫响应的直接结果,不同时期强迫因

子的重要性可能不同,Liu等<sup>[42]</sup>对全球季风降水的研究显示,在工业时代之前,太阳直接辐射和火山强迫能很好地解释全球季风降水变率,而在20世纪全球季风强度变化有一个不同于中世纪暖期的空间分布,这说明工业时代以来,全球变暖对季风降水的影响,一方面源自大气温室气体的增加,另一方面源自太阳辐射输入的增加。其模式研究结果还显示,在太阳活动偏弱的小冰期(1450—1850年),全球季风降水也偏弱,相反,在中世纪暖期,全球季风偏强。这似乎与Verschuren等<sup>[43]</sup>和Zhao等<sup>[44]</sup>的研究结果(东非和中国华南地区降水与太阳辐射呈反相关)有些矛盾,但根据之前的结论和Haigh等<sup>[45]</sup>的研究结论仔细分析可发现,两者可能并不矛盾,因为多数研究的结果显示,太阳活跃期,Hardley环流扩大,导致副热带干旱区向北扩展,北半球季风北界位置偏北,使得某些地区脱离原先的季风区,降水量反而偏少,而全球大多数陆面地区由于季风的加强而降水偏多。可见,全球变化和区域变化可能是不一致的,由于各地区局地气候系统不同,全球变化不可能完全代表区域变化。

### 2.2.2 区域尺度

研究显示,特定地点的最强响应往往比全球平均响应要大1个量级,例如,第23太阳周某些地方的温度增加可达1℃,远大于全球平均值,水循环(例如季风、降水、干旱等)对太阳驱动的气候变化显然更为敏感<sup>[6]</sup>。所以,区域性降水对太阳活动的响应信号可能是较强的。

在北美,关于天文因子与干旱的研究由来已久(可参见文献[9]),上个太阳周(第23太阳周)以来,这方面的研究取得一定进展。Cook<sup>[46]</sup>利用一个高质量的干旱重建资料,重新评估了美国西部干旱周期的强迫因子,最终确认,太阳和月球的影响相互作用,共同调制着最近200年来美国西部的干旱周期。Woodhouse和Overpeck<sup>[47]</sup>系统地总结了导致美国中西部准20年干旱周期的3个可能机制,其中之一就是太阳一月亮周期的调制作用。但是,Perry<sup>[48]</sup>的研究增加了这种关系的复杂性,发现美国许多地区的降水变化并不同步于太阳辐射变化,而是明显滞后于太阳辐射变化数年。另一方面,关于千年周期的研究虽不属于近百年气候变化,但其取得的成果有助于认识近百年来的气候变化。Bond等<sup>[49]</sup>在2001年发现了北大西洋地区1500年的气候周期(Bond周期),Li等<sup>[50]</sup>利用美国东北部湖面记录代替降水量,得出的一些结论与Bond相似,发现千年尺度上大西洋和北美地区存在干—冷的相关关系,并与其他一些学者<sup>[49, 51]</sup>一样,指出在千年尺度上,太阳强迫是一种较合理的调制AO/

NAO的机制。根据他们的研究结论，如果中世纪暖期处于上一个Bond周期的上升位相，那么现在可能就处于另一个Bond周期的上升期，这样，如果不考虑温室气体的作用，未来北美西南部的干旱可能会加剧，而亚洲季风区可能会变得更为湿润。

在非洲，Stager等<sup>[52]</sup>发现东非地区降水与蒸发之比存在类似Bond周期的振荡，Verschuren等<sup>[43]</sup>的研究支持了Stager的观点，利用3个不同的代用资料分析发现，过去千年里，从十年到百年尺度上，赤道东非的降水与太阳辐射都基本呈反相关，中世纪暖期较干，小冰期（1270—1850年）相对较湿，降水最盛期被推测发生在蒙德极小期（1645—1715年），但是，小冰期又被3个严重的干旱期所打断，每个都长达几十年，并且，研究发现这几次干旱都比20世纪记录的任何干旱更为严重，这也许对CO<sub>2</sub>增加背景下的现代气候变化和极端气候事件的研究有所启示。

在阿拉伯地区和南亚地区，强降水量的直接原因被解释为太阳活跃期较强的低层南风<sup>[53]</sup>，Neff等<sup>[54]</sup>也认为，太阳变率虽然微小，但大气和海洋环流可能会放大这种原始输入，使夏季风北界远离原始位置，导致非洲撒哈拉地区、阿拉伯地区和印度地区的旱涝发生显著变化，这已经被一些模式研究所证实<sup>[55]</sup>。Kodera<sup>[56]</sup>、Bhattacharyya和Narasimha<sup>[57]</sup>指出，阿拉伯和印度地区降水量偏多对应高太阳活动年。Kodera<sup>[56]</sup>还进一步指出，太阳活动影响季风并不是通过对流层的辐射加热，而是通过平流层对赤道对流的上升支的调制完成的，这一过程产生了印度洋对流层活动呈南北向的“跷跷板”效应。

在东亚和中亚地区，早在20世纪上半叶，竺可桢<sup>[58]</sup>和涂长望<sup>[59]</sup>就对太阳和中国气候做了开拓性的研究。杨鉴初<sup>[60]</sup>和王绍武<sup>[61]</sup>等把日地关系的研究推广和深化，并把太阳黑子相对数应用到气象台站的业务预报中。对于降水与太阳活动的关系问题，Chen<sup>[62]</sup>、徐群和金龙<sup>[63]</sup>、屠其璞<sup>[64]</sup>等人进行了大量研究，得出许多有

应用价值的结论。近些年，由于探测手段的增加、数据的更新扩展和代用资料的使用，有关中国地区降水变化与太阳变率关系的问题，得到学者们进一步的认识和证实<sup>[65-74]</sup>。研究东亚地区降水与太阳活动的关系问题，需充分考虑东亚季风系统和这里特殊的地理环境，因为它很可能对揭示物理机制有所帮助。近年来，这方面的研究有一定进展，需给予重视，它对于完整地理解和验证太阳—气候的关系和作用机理有重要意义。Wang等<sup>[32]</sup>和Tan等<sup>[75]</sup>利用代用资料和文献记录，分析古气候的亚洲季风降水时，都指出季风强度受太阳活动周期控制。最近，Zhao等<sup>[44]</sup>对近百年来中国夏季降水与太阳活动的关系做了严格检验，确认了东亚夏季风爆发期季风区雨带纬度位置年代际变化一定程度上依赖于太阳黑子周期位相，它是导致长江以南和以北地区降水量与太阳周期关系相反的直接原因，并发现初夏西南季风强度和北界位置与太阳黑子周期的年代际锁相关系可以合理地解释这种现象（图2）。

在南半球，同样有研究证实了太阳—降水之间的关系。Thresher<sup>[76]</sup>检测了澳大利亚、南非和南美地区的相关数据，发现南半球的海平面气压、降水与太阳黑子周期有较明显的相关，指出这种同步性可能与南半球纬向西风北界位置的年代际振荡有密切关系。Nordemann等<sup>[77]</sup>通过小波交叉谱等方法揭示出巴西和智利地区降水代用资料中显著的200年（DeVries-

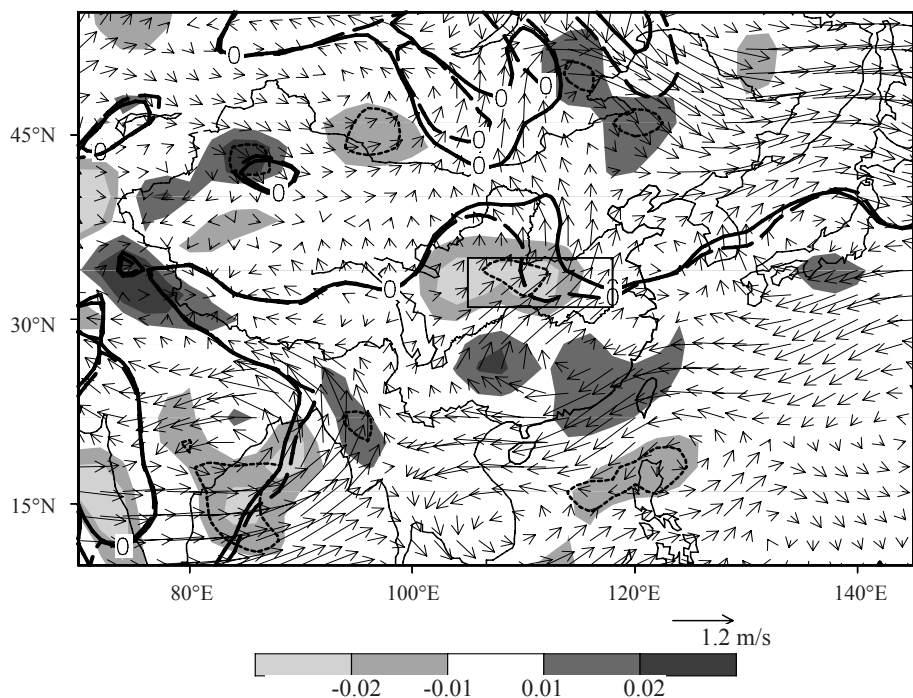


图2 106年（1901—2006年）内太阳高年和低年的6月700hPa风场之差和南北风分界线，箭头：水平风（单位：m/s）；阴影：垂直速度（单位：Pa/s），其负（正）值表示上升（下沉）速度；粗实线/粗长虚线代表太阳高/低年平均南风0线；短虚线包围的区域是垂直速度通过95%信度水平的区域（使用Monte Carlo检验）；矩形框表示淮河流域<sup>[44]</sup>

Suess周期)、80年(Gleissberg周期)、22年(Hale周期)和11年(Schwabe周期)的太阳活动周期。

## 2.3 区域性气候模态

区域性气候模态,例如,北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、ENSO、准两年振荡(QBO)、太平洋年代际振荡(PDO)、太平洋—北美型(PNA)等,在气候系统中的作用是十分重要的,它们受气候系统的影响,同时,也对气候本身施加影响<sup>[78]</sup>。有关太阳—气候变化关系中的一个重要问题是这些气候模态是否对太阳变率产生响应,从而传递甚至放大或修改太阳信号,最终影响气候变化。近些年的有关研究主要集中在AO、NAO、QBO和ENSO等方面。

### 2.3.1 太阳活动对AO和NAO的影响

已有的研究大多认为,太阳活动对中高层大气的物理化学等过程有重要影响,对地面气候影响的直接证据较少,而AO在平流层与对流层的耦合中可能有重要作用,因而许多研究对AO给予了特别的关注。NAO常被认为是一个区域性的AO<sup>[78]</sup>。Shindell<sup>[79]</sup>使用一个气候模式研究发现,太阳活动影响着AO,并指出蒙德极小期,气候的区域性差异主要与AO和NAO的低指数状态有关。Kodera<sup>[80]</sup>和Ogi等<sup>[81]</sup>的研究表明,北半球海平面气压变化的空间结构受太阳活动强弱影响,在太阳活跃期,这种空间结构更接近AO,具有半球特征,而在太阳非活跃期,信号被局限在大西洋地区,更像NAO型。Huth等<sup>[82]</sup>部分地验证了该结论,但更倾向于认为太阳活动低年(非最小年),AO较弱。不过,关于蒙德极小期NAO的特征,大部分研究较为一致地认为,期间减弱的太阳辐射对应一个负的NAO型<sup>[83, 84]</sup>。最近有学者用NAO对太阳活动周的响应来解释近几年的欧美冷冬<sup>[23, 25]</sup>。尽管不同的研究结果在细节上有些差异,但大多认为AO或NAO对太阳活动的响应可能是太阳影响在气候变化机制中的重要环节,近来有研究发现太阳影响气候变化是通过激发这种模态而实现的,并初步提出了太阳活动通过这种环状模结构引起气候异常的机制<sup>[85-86]</sup>。

### 2.3.2 太阳活动对QBO的影响

Labitzke<sup>[87]</sup>在1987年首先发现了北极地区平流层温度与太阳活动和QBO存在一定的非线性关系后,许多学者开始重视QBO与太阳活动的关系。近些年,一些研究<sup>[85, 88, 89]</sup>指出, AO指数在不同高度上受太阳变率的影响依赖于热带平流层QBO的时间和位相。Gray等<sup>[90]</sup>提出,太阳黑子周期与QBO的相互作用可能是由于平流层高层风异常的相互作用影响平流层爆发性增

温的演变和爆发时间所致,后来,Matthes等<sup>[91]</sup>用数值模拟初步验证了这一点。最近的研究已经显示,平流层内由太阳辐射而带来的直接变化能够改变向上的行星波传播,并通过极夜急流的调制和Brewer-Dobson(BD)环流的变化导致低层大气的间接反馈<sup>[92]</sup>,这种反馈可能是由于非绝热加热<sup>[93]</sup>,最终影响QBO的周期<sup>[94]</sup>。

### 2.3.3 太阳活动对ENSO的影响

Haigh<sup>[55]</sup>的模拟研究曾发现增强的太阳活动可以引起平流层变暖,从而引起平流层风场和对流层Hadley环流下沉支向高纬移动,导致ENSO系统发生变化。另一种太阳影响ENSO的可能方式是通过改变云和辐射。Farrar<sup>[95]</sup>发现太平洋中部的云量与NINO3指数的高相关关系。Marsh和Svensmark<sup>[96]</sup>根据ISCCP数据,得出低云量受太阳活动调制的结论,尽管该结论受到争议,但它提供了太阳活动影响ENSO的一种可能途径。与前面的观点不同,Ruzmaikin<sup>[97]</sup>认为,ENSO可能并不只是单一地响应外部强迫,而是通过随机共振机制激发大气异常状态(如PNA型),从而放大太阳强迫对气候的影响。

而关于ENSO位相与太阳黑子周期位相的关系,最近的一些研究结论是有差异的。White和Liu<sup>[98]</sup>注意到ENSO暖事件常与太阳峰年匹配,并且提出非线性位相锁定能够解释赤道东太平洋SST变率的重要部分。但是,Meehl等<sup>[99]</sup>研究发现太阳黑子峰年,对应La Niña位相(ENSO冷事件)。Roy和Haigh<sup>[100]</sup>认为,这种分歧的原因可能是由于太阳黑子峰年一般超前于年代际的太阳辐射峰年一年左右。

## 3 太阳活动对气候变化的影响——机制研究

关于太阳活动影响气候变化的可能机制,至少有三种<sup>[101, 102]</sup>(如图3): (1) 太阳总辐射机制(TSI机制),该机制认为太阳活动引起的太阳常数(即日地平均距离处的太阳总辐照度)变化,直接驱动了气候变化。(2) 太阳短波辐射变化机制(UV机制),该机制认为太阳紫外辐射变化能引起地球中高层大气物理化学性质的变化(比如臭氧的变化),通过行星波作用等将变化传递到对流层,引起天气气候变化。(3) 能量粒子(包括太阳能量粒子(SEP)和银河宇宙射线(GCR))机制,该机制认为太阳活动影响地球空间天气(主要影响空间环境中的各种粒子通量),通过对特定区域云微物理过程的影响,导致云层宏观特征变化,在短时间尺度上引起气象要素变化,长时间尺度上引起全球云量变化和云寿命变化,导致全球辐射平衡变化,从而驱动气候变化。前两种都与太阳辐射有关(前者与总辐射有关,后者

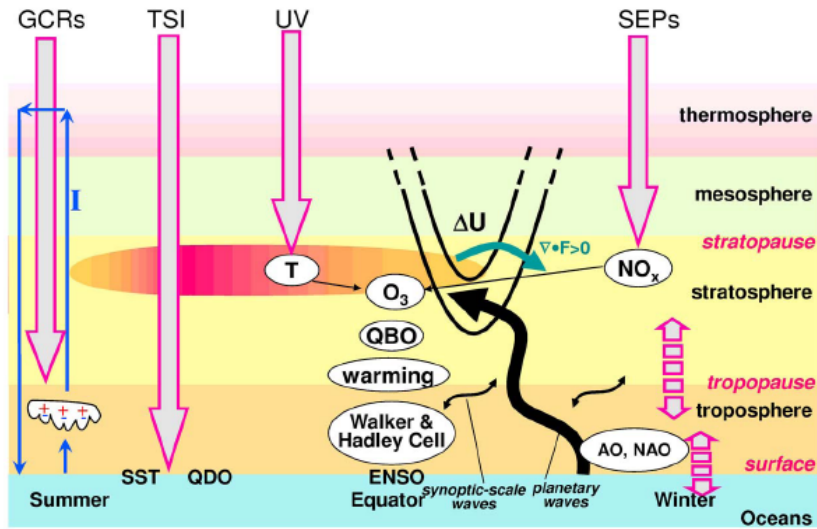


图3 太阳影响气候概念图，图中显示了通过太阳辐射变化 (TSI和UV) 和微粒辐射效应 (SEP和GCR) 直接和间接地影响气候。两个虚箭头表示平流层与对流层的耦合和海气耦合<sup>[103]</sup>

主要与紫外辐射有关)，第三种则与能量粒子有关<sup>[103]</sup>。另外，还有太阳活动通过影响地磁场来影响地球气候等机制。近些年的机制研究，尤其是UV机制和能量粒子机制研究较为活跃，主要是围绕输入地球的微小的能量变化怎样能与地球气候系统中大的能量变化联系在一起这一主要科学问题展开的。

### 3.1 太阳总辐射机制 (TSI机制)

20世纪80年代，人们认识到，太阳常数并非一个真正的常数，其变化周期与太阳黑子数有密切关系<sup>[104]</sup>，因此，现在越来越多的科学家采用太阳辐照度这个更为严谨的名词<sup>[105]</sup>。许多研究（例如古气候研究）认为，太阳辐照度的变化是导致地球长期气候变化的主因。然而，对于较短的时间尺度，其变化是否直接影响地球气候，存在不少争议，因为卫星监测数据显示，近几个太阳周，TSI的变化量仅为 $1.3\text{W/m}^2$ ，约占太阳总辐射的0.1%<sup>[106]</sup>。2006年，Foukal<sup>[111]</sup>进一步证实，在11年太阳黑子周期期间，太阳总能量输出的变化是由于太阳面上暗的和亮的结构变化引起的，并认为自1978年以来由航天器测量到的变化太小而不能对过去30年加速的全球变暖做出大的贡献，太阳变亮应该不可能直接对17世纪以来的全球变暖有显著影响，但是，太阳紫外线和磁等离子体输出的变化对气候的强迫作用不能被排除。不过，海洋对TSI直接吸收的变化可能是重要的，因为海洋具有大的热容量，能“积分”长时间的和微小的热输入量的变化<sup>[103]</sup>，这一方面值得深入研究。最近，有关TSI的测量有了新进展，Kopp和Lean的研究<sup>[107]</sup>尤其需要关注，他们给出了一个较低的TSI数值 ( $1360.8 \pm 0.5\text{W/m}^2$ )，比之前公认的数值低了近 $5\text{W/m}^2$ ，并认为散射光是导

致上一代太阳辐射计测量值偏高的原因，而新一代辐射计 (TIM) 的特殊设计限制了漫射光进入放有仪器的空腔。

虽然，TSI机制饱受争议，但近些年太阳物理学界对未来太阳活动总体趋势的预测是值得关注的，尤其第23太阳周异常长的极小期已引起学者们的高度关注和警觉。Svalgaard等<sup>[108]</sup>和Schatten<sup>[109]</sup>2005年曾预测第24太阳周将是一个弱的太阳周，甚至可能是百年来最弱的。后来，Penn和Livingston<sup>[110, 111]</sup>利用Zeeman splitting方法研究太阳黑子磁场强度衰减趋势，对未来几十年太阳周强弱做出大胆推测（更为具体的文章“Sunspots

may vanish by 2015”在著名科学博客WUWT发表），他们推测，如果按1995年之后的趋势发展下去，到2015年，太阳黑子磁场可能会跌至1500高斯，届时，黑子恐将很难产生。也就是说，现在的第24太阳周可能将会是未来几十年内最后一个有黑子产生的太阳周。这一结果引起学界的广泛讨论。然而，Dikpati<sup>[112]</sup>在2006年根据修改的通量输送动态模式预测第24太阳周将是较强的一个太阳周（比前一个强30%~50%）。不过，最近在2011年6月的美国天文学会太阳物理学分会上，3个独立研究项目分别从太阳黑子磁场强度减弱趋势、向低纬迁移的纬向流（扭转振荡）信号是否出现、日冕极向漂移速度的角度分析并预测了未来的太阳活动趋势，并得出一个共同的结论：太阳有可能将进入休眠期。Lockwood从历史统计的角度推测，在未来50年，宇宙射线有8%的概率重新恢复到蒙德极小期水平<sup>[113]</sup>，并证实欧洲地区的冷冬与太阳活动偏弱有关<sup>[22]</sup>。未来太阳进入休眠期究竟是大概率还是小概率事件？以上证据可能还并不充分，现在得出结论还为时尚早，但有关研究应该予以重视。另一方面，如果太阳真的进入第二个“蒙德极小期”，那么地球气候会发生什么变化呢？许多学者认为这不会对现代气候变暖的趋势有太大影响，不会进入“小冰期”。不过，果真如此吗？最近Feulner和Rahmstorf<sup>[114]</sup>的初步研究指出，它可能会使全球变暖减缓 $0.3\text{C}$ ，而欧洲的平均温度可能会降低 $1\sim 2\text{C}$ 。

### 3.2 太阳短波辐射变化机制 (UV机制)

直接用太阳总辐射的微小变化来解释太阳变率对气候年代际变化的影响遇到很多困难，这迫使人们需要找到一种合理的信号放大机制来间接解释太阳变率

如何驱动气候变化, UV机制被认为是一种可能的机制。这种机制认为, 作为太阳总辐射的一部分, 太阳紫外辐射有着较大的变率, 能够影响和改变中高层大气(如平流层臭氧)的许多性质, 通过某种转移(换)机制引起对流层大气环流发生改变, 最终影响气候。这种机制的关键有两方面: 一方面, 太阳辐射(如紫外辐射部分)对中高层大气(如臭氧)的影响; 另一方面, 中高层大气与对流层大气的耦合和相互作用。

尽管紫外吸收只占总的太阳能量输入的一小部分, 但是它有着相对大的11年太阳周期变率, 可达6%~8%的变化<sup>[115]</sup>, 可以占总太阳辐射变化的15%<sup>[116]</sup>。这比起同期TSI约0.1%的变化而言, 要大得多, 且最近的测量结果更出乎人们意料, NASA2003年发射的“太阳辐射和气候实验”(Solar Radiation and Climate Experiment, 简称SORCE)卫星提供了第一个从X射线到近红外的完整太阳分光辐照度监测结果, 它显示在太阳周期的下降期(2004—2007年), UV辐射下降幅度比之前的结果大得多, 有4~6倍的下降, 不过它部分地被可见光辐射增加所补偿<sup>[117]</sup>。Lockwood<sup>[118]</sup>的最新研究针对同一时间的两种卫星数据, 发现当校准不同来源的数据后, 第23太阳周的极小期UV辐射确实比前一个太阳极小期有显著下降, 而不进行数据校准时只有小的变化。但是, 2003年之前的UV辐射测量是否也像TSI测量一样, 存在Kopp和Lean<sup>[107]</sup>认为的仪器设计上的缺陷, 而导致测量结果存在较大偏差呢? 这是一个十分重要的问题, 因为UV辐射对平流层加热和臭氧尤其重要, 如果下降4~6倍的结果是正确的, 那么与之联系的温度和臭氧的响应, 对流层顶的太阳辐射强迫, 以及太阳对气候变化的影响, 都完全有必要重新评估<sup>[119]</sup>。最近, 已有研究将最新的UV辐射测量结果应用于气候模式, 来评估大气响应<sup>[120, 121]</sup>。

另一方面, 从辐射强迫的角度来看, 臭氧由太阳短波辐射产生, 而一定程度上受长波辐射所破坏<sup>[122]</sup>。另外, 高纬地区的高能带电粒子也能破坏臭氧, 目前, 它们的净效应的变化幅度, 甚至符号仍然不十分确定, 由太阳引起的臭氧净辐射强迫估计范围从约-25%<sup>[123]</sup>到+45%<sup>[124]</sup>, 并且很大程度上依赖于臭氧增加量的分布状况。不过较近的研究<sup>[122]</sup>表明, 由于太阳紫外辐射的变率幅度较大, 使臭氧量更强烈地受太阳活动所调制, 而不是破坏, 这导致太阳高年, 平流层臭氧的净增加, 最大幅度在2%左右, 但是其结果还需要更严格的统计检验。

这一机制中, 平流层和对流层的耦合与相互作用

是一个重要方面。平流层臭氧的变化, 可能通过一种与臭氧有关的反馈机制放大信号强度<sup>[125]</sup>, 引起平流层加热场改变, 在赤道平流层顶出现最大值(可产生约2K的温度变化), 平流层下部出现次大值<sup>[126]</sup>, 再通过平流层与对流层的耦合引起大气环流(尤其对流层大气环流)的变化。关于大气环流和太阳活动周期的关系, 较为公认的认识是: 在太阳黑子高年, 有更多的能量进入地球, 导致Hardley环流扩张和赤道辐合带(ITCZ)的增强, 从而导致降水增多和平均表面气压降低, 结果沙漠区将向极地方向移动, 大多数地区降水增加, 而沙漠地区(多位于副热带地区)变得更干<sup>[9]</sup>, 这一观点的一些环节近年逐渐被证实<sup>[45, 56, 127]</sup>。最近, 一些学者通过大气环流模式研究这种耦合机制<sup>[45, 128, 129]</sup>。Haigh等<sup>[45]</sup>的模式研究显示, 从低纬到高纬递减的加热分布, 会使急流和Hadley环流减弱并向极地移动。在Haigh和Blackburn<sup>[129]</sup>的实验里, 对流层顶静力稳定度改变的初始效应是减少那里的涡旋动量通量辐合, 从而导致通量强迫异常的垂直输送和其下方的动力异常, 也就是说, 太阳对平流层的加热可以使对流层环流发生变化, 其中平流层变化对波传播的影响是这种机制的关键。北半球冬季平流层的热扰动可以调制行星波的垂直传播, 通过极夜急流和BD环流反馈过程向下影响到低层<sup>[92]</sup>, 有研究显示它可能会促使AO进入正位相状态<sup>[130]</sup>。这些工作对理解太阳辐射的微小变化怎样显著地影响低层大气环流提供了理论路径。

### 3.3 能量粒子机制(SEP和GCR机制)

SEP机制认为, 太阳质子事件时太阳高能粒子能够在极区进入地球磁场, 沉降到热层、中间层和平流层高层, 引起的电离和分解作用能在天和月的尺度上明显影响那里的大气化学成分(如HO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>和臭氧等), 最终间接影响对流层气候<sup>[131, 132]</sup>。已有研究发现, SEP产生的NO<sub>x</sub>能够在极区向下输送到冬季平流层, 影响臭氧量<sup>[131]</sup>。最近, 有研究发现, 南半球NO<sub>x</sub>总量的一部分(可达10%)可归因于SEP<sup>[133]</sup>。但是, 目前这种机制仍缺乏的证据是, 与之有关的臭氧的变化是否可以在气候尺度上改变那里的大气温度和环流(比如, 极涡), 而不只停留在几个非常大的太阳质子事件发生之后。

GCR机制认为, 宇宙射线能直接影响天气气候<sup>[103]</sup>。1959年, Ney最早提出宇宙射线可能通过对云的调制来直接影响气候<sup>[134]</sup>。Dickinson等<sup>[135]</sup>进一步指出, 宇宙射线的电离作用可能使平流层下部和对流层上部存在大的离子簇, 有利于硫酸盐气溶胶(一种重要的成云凝结核)的生成。最初, 这种机制能较好地

解释总云盖与宇宙射线间的关系<sup>[136]</sup>，但后来人们发现宇宙射线与低云量，而不是总云量，存在强相关关系<sup>[96]</sup>，但这种机制不能解释这种关系。

近些年，一种新的关于GCR—云之间的联系机制是通过全球大气电路实现的<sup>[137]</sup>。全球大气电路引起平静天气（非雷暴天气）时垂直电流密度在电离层和地面之间循环流动，层云可引起局地水滴和气溶胶在其上下边界处充电，从而改变云的微物理结构，由于电流密度受宇宙射线离子产量的调制，所以，全球电路提供了太阳变率和云之间的一种可能联系，它可以较好地解释全球低云量与宇宙射线之间的相关关系。然而，相比于UV机制，这种机制还处于“婴儿期”，目前刚开始定量化研究。初步结论是，在太阳高年，GCR的作用是减弱低纬地区的云，产生增暖效果，这与TSI的直接调制作用效果一致<sup>[103]</sup>。目前，传导电流密度对云影响的研究集中于水平层云，因为其往往具有强烈的空气电导率梯度，使空间电荷能够被积累<sup>[138]</sup>，同时，由于静电力的作用，电荷能够抑制蒸发，影响粒子与粒子和粒子与水滴间的碰撞，且在低空更为明显<sup>[137, 139, 140]</sup>。

最近的一些研究对云和GCR的联系提供了重要证据，但另一些研究却提出了异议。Marsh和Svensmark<sup>[96]</sup>曾考虑卫星间的相互校准问题，对国际卫星云气候计划（ISCCP）D2云数据进行了技术调整，从而发现低云量与GCR之间强烈的正相关。然而，根据现有研究结果，校准方式不同得出的云数据序列存在巨大差异<sup>[103]</sup>，甚至有些研究认为，ISCCP数据很可能不适合长期趋势和变率的研究<sup>[141]</sup>。但是，如果使用短期的（如3小时）ISCCP云数据，去除长期趋势，低云—GCR之间的正相关是显著的<sup>[142]</sup>。利用其他云量数据（如船基、陆基和其他卫星监测设备等），一些学者发现了云—GCR之间的某些联系<sup>[143, 144]</sup>，但也有一些学者给予了否定或部分否定<sup>[145-148]</sup>。

#### 4 讨论和小结

目前，太阳—气候变化之间的关系，虽然存在很多争议和问题，但正是这些争议和问题，指明了这一领域未来的研究方向。

在观测方面，最近关于SORCE卫星提供的TSI较低的测量值和UV辐射出乎意料的下降幅度，需要进一步给予确认并给出合理的解释和评估其重要意义。关于在蒙德极小期，TSI究竟减少到什么程度，以及期间的变冷是全球特征还是区域性特征，也还存在争论。另一方面，太阳的能量输入是一个全球信号，为何很多研究的结果表明，气候响应有明显的区域性差

异？不少科学家认为这可能涉及到信号放大机制和系统敏感性问题。因此，在区域尺度上，今后的研究需高度重视局地气候系统的作用，比如研究东亚地区气候与太阳变率关系问题时，需关注季风系统的作用，如能检测到太阳周期信号是否和怎样被季风系统所修改甚至放大，那么对太阳—气候关系的研究将有重要贡献。但这一工作并不容易，因为其关键是信号的分离工作，前提是各种要素数据自身有严格的质量保证（足够的时间跨度和时空精度），对某些要素而言，这一要求目前很难达到。另外，一些强迫因子会产生相似的气候响应，使信号分离工作更加复杂。另外，关于臭氧对太阳辐射的响应程度和放大过程目前存在大的变化范围和不确定性，IPCC第四次评估报告中，关于对流层顶辐射通量变化的定义是瞬时的，它假设了平流层已经对辐射强迫做出了调整，这会造成辐射强迫的减少，因为作为响应出现的平流层分子氧和臭氧减少了到达对流层顶的太阳辐射；另一方面，增加的臭氧减少短波辐射，但是增加长波辐射。

在机制解释方面，最重要的问题是，太阳微小的变化是否和如何被放大最终导致气候变化的。从太阳到地球大气层顶，再到地球表面甚至地球内部，这一复杂的“链条”当中，是否存在一个（些）环节发挥着关键的修改信号的作用，找出这个（些）中间环节是理论突破的关键。关于TSI机制，根据最近的探测和研究结果，之前认为的一个太阳周TSI只有 $1.3\text{W/m}^2$ 的变化量可能是有疑问的，需要新一代辐射计和新太阳峰年的验证，而且由于可能存在的非线性气候系统的复杂性，微小的变化量也不能完全否定太阳—气候之间的联系。关于UV机制，一些研究认为平流层低层的加热及其空间分布是导致副热带急流北移和热带Hadley环流扩张的原因，但对于平流层低层出现的温度变化次大值，至今没有很好的解释，而且这种平流层与对流层的耦合原理以及行星波在其中的作用仍亟待研究。关于GCR—云关系也存在几个问题：一些研究结果反映出云量变化滞后于GCR数月时间，这是不能得到GCR—云机制的合理解释的。因为云对GCR的响应时间（考虑云凝结核对GCR的响应时间和云本身的生命期）应是几天之内，而不是几个月。另一方面，目前卫星观测到的低云量数据（除了红外探测外），大多可信度不够，因为中高云会遮挡低云，并且不同云类型的变化范围往往可达百分之几，而百分之几的误差就完全可以破坏先前明显的一致性，所以其探测结果广受争议。另外，20世纪90年代卫星云数据的调整和对缺失数据的处理，导致GCR—云机制的验证存在困难。这些问题的存在，一方面，需要继续

应用简单模式来考察特定机制, 比如宇宙射线对云的影响。另一方面, 需要发展和采用考虑相应物理、化学过程的海洋—对流层—平流层耦合的气候模式, 准确评估太阳信号。

由于新太阳周的到来, 太阳活动最近几年将日渐活跃, 这会使灾害性空间天气事件逐年增加, 但是, 它也提供了一个区分源于太阳和人类的气候效应的可能机会, 也为有关物理机制的验证、模式的评估等许多重要科学问题的解决创造了良好时机, 例如监测新太阳峰年黑子数等参数来检验预报模式和预测理论, 利用新一代辐射计获取完整太阳周TSI数值和UV辐射变化值, 利用该时机验证欧美严冬与太阳活动的关系等。如果能够发现并确认太阳—气候之间关系的某种规律, 对于气候预测将产生重要突破。关于第23太阳周异常长的衰减期和第24太阳周的推迟到来, 许多科学家已预测错了, 这说明太阳内部可能已经发生了一些微妙变化, 但是这些变化到底是什么? 对未来的地球是否会有影响? 人类还没有足够的认识和理解。因此, 加强这一多学科交叉领域的研究对于认识气候变化和防灾减灾有着重要和深远的影响, 我们需要对即将到来的太阳峰年作好准备, 而不应该像过去那样再从教训中重新学习一遍。

致谢: 承蒙评审专家提出宝贵意见, 特此致谢。

#### 参考文献

- [1] Russell C T, Luhmann J G, Jian L K. How unprecedented a solar minimum? *Rev Geophys*, 2010, 48, RG2004, doi:10.1029/2009RG000316.
- [2] 王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 不久的将来气候会变冷吗? *科学通报*, 2010, 55(30): 2980-2985.
- [3] 吕建永, 杨亚芬, 牡丹, 周全, 毛田. 空间天气研究进展. *气象科技进展*, 2011, 1(4):26-36.
- [4] Rind D. The Sun's Role in Climate Variations. *Science*, 2002, 296: 673-677.
- [5] 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 全球增暖的另一可能原因初探. *大气科学*, 2003, 27(5): 789-797.
- [6] Lean J L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2010, 1(1): 111-122.
- [7] 王绍武, 葛全胜, 王芳, 等. 全球气候变暖争议中的核心问题. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 656-665.
- [8] Herschel W. Observations tending to investigate the nature of the sun in order to find the causes or symptoms of its variable emission of light and heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1801, 91: 265-318.
- [9] Hoyt D V, Schatten K H. *The Role of the Sun in Climate Change*. New York: Oxford University Press, 1997.
- [10] Herman J R, Goldberg R A. *Sun, Weather and Climate*. Honolulu, Hawaii: University Press of the Pacific, 2005.
- [11] Foukal P, Frohlich C, Spruit H, Wigley T M L. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature*, 2006, 443: 161-166.
- [12] Benestad R E, Schmidt G A. Solar trends and global warming. *J Geophys Res*, 2009, 114, D14101, doi:10.1029/2008JD011639.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (AR4)*, edited by S. Solomon et al. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [14] Tung K K, Camp C D. Solar cycle warming at the Earth's surface in NCEP and ERA-40 data: A linear discriminant analysis. *J Geophys Res*, 2008, 113, D05114, doi:10.1029/2007JD009164.
- [15] Ramaswamy V, Hurrell J W, Meehl G A. Why do temperatures vary vertically (from the surface to the stratosphere) and what do we understand about why they might vary and change over time? in *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Difference*, edited by T. R. Karl et al. U.S. Clim Change Sci Program, Washington, D. C, 2006.
- [16] Luterbacher J, Rickli R, Xoplaki E, Tinguely C, Beck C, Pfister C, Wanner H. The late Maunder Minimum (1675-1715)—A key period for studying decadal scale climatic change in Europe. *Clim Change*, 2001, 49: 441-462, doi:10.1023/A:1010667524422.
- [17] Raspopov O M, Dergachev V A, Kolstrom T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 209: 127-139.
- [18] Mendoza B, Lara A, Maravilla D, Jáuregui E. Temperature variability in central México and its possible association to solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63: 1891-1900.
- [19] Alvarez Pomares O, Pérez Doval J, Cárdenas Pérez P A, Vega González R. Solar Variability Manifestation on Earth Climate Parameters Registered at a Tropical Location. 24 meeting of IAU. *The Sun and Weather*. Manchester: Joint Discussion 7, August 2000.
- [20] Soon W, Dutta K, Legates D R, Velasco V, Zhang W. Variation in surface air temperature of China during the 20th century. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73(16), 2331-2344.
- [21] 曲维政, 陈璐, 黄菲, 张微, 朱小洁, 邓声贵, 杜凌. 南半球对流层气候年代际变化及其与太阳活动的联系. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 794-803.
- [22] Lockwood M, Harrison R G, Owens M J, et al. The solar influence on the probability of relatively cold UK winters in the future. *Environmental Research Letters*, 2011, 6 (3), 034004.
- [23] Ineson S, Scaife A A, Knight J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 753-757, doi:10.1038/ngeo1282.
- [24] Lockwood M, Harrison R G, Woollings T J, Solanki S K. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environmental Research Letters*, 2010, 5 (2), 024001.
- [25] Woollings T, Lockwood M, Masato G, Bell C, Gray L. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L20805, doi:10.1029/2010GL044601.
- [26] White W B, Lean J, Cayan D R, et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 3255-3266.
- [27] White W B, Dettinger M D, Cayan D R. Sources of global warming in the upper-ocean on decadal period scales. *J Geophys Res*, 2003, 108(C8), 3248, doi:10.1029/2002JC001396.
- [28] Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophys Res Lett*, 1995, 22(23), 3195-3198.
- [29] Tett S F B, Jones G S, Stott P A, et al. Estimation of natural and anthropogenic contributions to 20th century temperature change. *J Geophys Res*, 2002, 107(D16), 4306, doi:10.1029/2000JD000028.
- [30] Meehl G A, Washington W M, Amman C M, et al. Combinations of natural and anthropogenic forcings and 20th century climate. *J Clim*, 2004, 17: 3721-3727.
- [31] Lockwood M, Fröhlich C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proc R Soc A*, 2007, 463(2086): 2447-2460.
- [32] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854-857.
- [33] Kerr R A. Changes in the sun may sway the tropical monsoon. *Science*, 2005, 308: 787.
- [34] Verschuren D, Damste J S S, Moernaut J, et al. Half-precessional dynamics of monsoon rainfall near the East African Equator. *Nature*, 2009, 462: 637-641.

- [35] Clayton H H. World Weather, New York: MacMillan, 1923.
- [36] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing. *Science*, 2009, 325: 1114-1118.
- [37] Currie R G. Luni-solar 18.6- and 10-11-year solar cycle signals in South African rainfall. *Int J Climatol*, 1993, 13: 237-256.
- [38] Currie R G. Luni-solar and solar cycle signals in Chinese dryness/wetness indices. *Int J Climatol*, 1995, 15: 497-515.
- [39] Currie R G. Variance contribution of luni-solar (Mn) and solar cycle (Sc) signals to climate data. *Int J Climatol*, 1996, 16: 1343-1364.
- [40] Lambert F H, Stott P A, Allen M R, et al. Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L10203, doi: 10.1029/2004GL019545.
- [41] Wasko C, Sharma A. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L03703, doi:10.1029/2008GL036310.
- [42] Liu J, Kuang X, Wang B, Ding Q, Soon W, Zorita E. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: Results from ECHO-G model. *J Clim*, 2009, 22: 2356-2371.
- [43] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1100 years. *Nature*, 2000, 403: 410-414.
- [44] Zhao L, Wang J S, Zhao H J. Signature of the solar cycle on decadal variability in monsoon precipitation over China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90(1), in press.
- [45] Haigh J D, Blackburn M, Day R. The response of tropospheric circulation to perturbations in lower - stratospheric temperature. *J Clim*, 2005, 18: 3672-3685, doi:10.1175/JCLI3472.1.
- [46] Cook E R, Meko D M, Stockton C W. A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bidecadal drought rhythm in the western United States. *J Clim*, 1997, 10: 1343-1356.
- [47] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2693-2714.
- [48] Perry C A. Solar-irradiance variations and regional precipitation fluctuations in the western USA. *International Journal of Climatology*, 1994, 14: 969-984.
- [49] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294: 2130-2136.
- [50] Li Y-X, Yu Z, Kodama K P. Sensitive moisture response to Holocene millennial-scale climate variations in the Mid-Atlantic region, USA. *The Holocene*, 2007, 17: 3-8.
- [51] Hu F S, Kaufman D, Yoneji S, et al. Cyclic variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic. *Science*, 2003, 301: 1890-1893.
- [52] Stager J C, Cumming B F, Meeker L D. A 10,000-year high-resolution diatom record from Pilkington Bay, Lake Victoria, East Africa. *Quaternary Research*, 2003, 59: 172-181.
- [53] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, 300: 1737-1739.
- [54] Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 2001, 411: 290-293.
- [55] Haigh J D. The impact of solar variability on climate. *Science*, 1996, 272: 981-984.
- [56] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L24209, doi: 10.1029/2004GL020928.
- [57] Bhattacharyya S, Narasimha R. Possible association between Indian monsoon rainfall and solar activity. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L05813, doi: 10.1029/2004GL021044.
- [58] 竺可桢. 我国历史上气候的脉动. *科学汇刊*, 1926, 16(2): 274-282.
- [59] 涂长望. 东亚活动中心与我国水旱灾之关系. *气象杂志*, 1936, 12: 600-619.
- [60] 杨鉴初. 近年来国外关于太阳活动对大气环流和天气影响的研究. *气象学报*, 1962, 32(2): 172-194.
- [61] 王绍武. 东亚大气活动中心的多年变化与我国的气候振动. *气象学报*, 1962, 32(1): 20-36.
- [62] Chen J Y. Tendency prediction of precipitation and inundation in July in the Sichuan basin, China. *International Journal of Climatology*, 1984, 4: 521-529.
- [63] 徐群, 金龙. 太阳活动与北半球副热带高压强度的耦合振荡. *大气科学*, 1986, 10(2): 204-211.
- [64] 屠其璞. 近百年来我国降水量的变化. *南京气象学院学报*, 1987, 10(2): 177-187.
- [65] 郭增建, 秦保燕. 黄河巨洪发生时间规律的讨论. *自然灾害学报*, 1992, 1(3): 101-105.
- [66] 冯松, 汤懋苍. 太阳活动百年尺度的跃变与气候跃变的相关分析. *高原气象*, 1998, 17(3): 266-270.
- [67] 赵娟, 韩廷本. 太阳活动, El Nino 对北京地区降雨的影响及预测. *地球物理学进展*, 1999, 14(1): 123-126.
- [68] 卫捷, 汤懋苍, 冯松, 等. 亚洲季风年代际振荡及与天文因子的相关. *高原气象*, 1999, 18(2): 179-184.
- [69] 李可军, 向福元. 中纬度地区的洪水与太阳活动关系的研究. *云南天文台台刊*, 2000, (2): 34-38.
- [70] Li X D, Zhu Y F, Qian W H. Spatiotemporal variations of summer rainfall over eastern China during 1880-1999. *Advances in Atmospheric sciences*, 2002, 19(6): 1055-1068.
- [71] 张家武, 金明, 陈发虎, 等. 青海湖沉积岩芯记录的青藏高原东北部过去800年以来的降水变化. *科学通报*, 2004, 49(1):10-14.
- [72] 姜彤, 张强, 王苏民. 近1000年长江中下游旱涝与气候变化关系. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 518-524.
- [73] 黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近400年来的降水量变化与太阳活动. *第四纪研究*, 2005, 25(002): 184-192.
- [74] 段长春, 孙绩华. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系. *气象科技*, 2006, 34(4): 381-386.
- [75] Tan L, Cai Y, An Z, Ai L. Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity. *Climate of the Past*, 2008, 4: 19-28.
- [76] Thresher R E. Solar correlates of southern hemisphere mid-latitude climate variability. *Int J Climatol*, 2002, 22: 901-915.
- [77] Nordemann D J R, Rigozo N R, de Faria H H. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records. *Advances in Space Research*, 2005, 35: 891-896.
- [78] Benestad R E. *Solar Activity and Earth's Climate* (2nd edition). Berlin, Heidelberg, New York: Springer praxis publishing, 2006.
- [79] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, Rind D, Waple A. Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science*, 2001, 294: 2149-2152.
- [80] Kodera K. Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(8), 1218, doi:10.1029/2001GL014557.
- [81] Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO). *Geophys Res Lett*, 2003, 30(22), 2170, doi:10.1029/2003GL018545.
- [82] Huth R, Bochník J, Hejda P. The 11-year solar cycle affects the intensity and annularity of the Arctic Oscillation. *J Atmos Sol -Terr Phys*, 2007, 69: 1095-1109.
- [83] Slonosky V C, Jones P D, Davies T D. Instrumental pressure observation from the 17th and 18th centuries: London and Paris. *Int J Climatol*, 2001, 21: 285-298, doi:10.1002/joc.611.
- [84] Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures of the Little Ice Age and Medieval climate anomaly and plausible dynamical origins. *Science*, 2009, 326: 1256-1260, doi:10.1126/science.1177303.
- [85] Ruzmaikin A, Feynman J. Solar influence on major mode of atmospheric variability. *J Geophys Res*, 2002, 107(D14), 4209, doi:10.1029/2001JD001239.
- [86] Ruzmaikin A. Effect of solar variability on the Earth's climate patterns. *Adv Space Res*, 2007, 40(7): 1146-1151, doi:10.1016/j.asr.2007.01.076.
- [87] Labitzke K. Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the north polar region. *Geophys Res Lett*, 1987, 14(5): 535-537, doi:10.1029/GL014i005p00535.
- [88] Lu H, Gray L J, Baldwin M P, Jarvis M J. Life cycle of the QBO-modulated 11-year solar cycle signals in the Northern Hemispheric winter. *Q J R Meteorol Soc*, 2009, 135: 1030-1043.

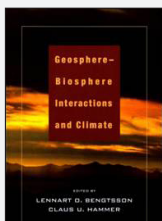
- [89] 刘毅, 陆春晖. 冬季太阳11年周期活动对大气环流的影响. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1269-1277, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.004.
- [90] Gray L J, Phipps S J, Dunkerton T J, et al. A data study of the influence of the equatorial upper stratosphere on Northern Hemisphere stratospheric sudden warmings. Q J R Meteorol Soc, 2001, 127: 1985-2003, doi:10.1002/qj.49712757607.
- [91] Matthes K, Langematz U, Gray L J, et al. Improved 11 - year solar signal in the Freie Universität Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB - CMAM). J Geophys Res, 2004, 109, D06101, doi:10.1029/2003JD004012.
- [92] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle. J Geophys Res, 2002, 107(D24), 4749, doi:10.1029/2002JD002224.
- [93] Gray L J, Rumbold S T, Shine K P. Stratospheric Temperature and Radiative Forcing Response to 11-Year Solar Cycle Changes in Irradiance and Ozone. J Atmos Sci, 2009, 66: 2402-2417.
- [94] McCormack J P. The influence of the 11-year solar cycle on the quasi-biennial oscillation. Geophys Res Lett, 2003, 30(22), 2162, doi:10.1029/2003GL018314.
- [95] Farrar P D. Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage-or is it only El Niño? Climatic Change, 2000, 47 (1-2): 7-15.
- [96] Marsh N, Svensmark H. Galactic cosmic ray and El Niño Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low - cloud properties. J Geophys Res, 2003, 108(D6), 4195, doi:10.1029/2001JD001264.
- [97] Ruzmaikin A. Can El Niño amplify the solar forcing of climate? Geophys Res Lett, 1999, 26(15), 2255-2258.
- [98] White W B, Liu Z. Non - linear alignment of El Niño to the 11-yr solar cycle. Geophys Res Lett, 2008, 35, L19607, doi:10.1029/2008GL034831.
- [99] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A coupled air - sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. J Clim, 2008, 21: 2883-2897, doi:10.1175/2007JCLI1776.1.
- [100] Roy I, Haigh J D. Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature. Atmos Chem Phys, 2010, 10: 3147-3153.
- [101] Pekarek A H. Solar Forcing of Earth's Climate. Environmental Geosciences, 2000, 7: 215, doi: 10.1046/j.1526-0984.2000.74003-7.x
- [102] 周立旻, Tinsley B A, 郑祥民, 王世杰. 太阳活动驱动气候变化空间天气机制研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(011): 1099-1108.
- [103] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. Rev Geophys, 2010, 48, RG4001, doi: 10.1029/2009RG000282.
- [104] Smith E A, Harr T H V, Hickey J R, et al. The nature of the short period fluctuations in the solar irradiance received by the Earth. Climatic Change, 1983, 5: 211-235.
- [105] 王绍武. 太阳常数. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 61-62.
- [106] Willson R. Total solar irradiance trend during solar cycle 21 and 22. Science, 1997, 277: 1963-1965.
- [107] Kopp G, Lean J L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. Geophys Res Lett, 2011, 38, L01706, doi:10.1029/2010GL045777.
- [108] Svalgaard L, Cliver E W, Kamide Y. Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years. Geophys Res Lett, 2005, 32, L01104, doi:10.1029/2004GL021664.
- [109] Schatten K H. Fair space weather for solar cycle 24. Geophys Res Lett, 2005, 32, L21106, doi:10.1029/2005GL024363.
- [110] Penn M J, Livingston W. Temporal Changes in Sunspot Umbral Magnetic Fields and Temperatures. Astrophys Journal, 2006, 649, L45-L48.
- [111] Penn M J, Livingston W. Long-term Evolution of Sunspot Magnetic Fields. Proceedings of the International Astronomical Union, 2010, 6: 126-133, doi: 10.1017/S1743921311015122.
- [112] Dikpati M, de Toma G, Gilman P A. Predicting the strength of solar cycle 24 using a flux-transport dynamo-based tool. Geophys Res Lett, 2006, 33, L05102, doi:10.1029/2005GL025221.
- [113] Lockwood M. Solar change and climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum. Proc R Soc A, 2010, 466: 303-329.
- [114] Feulner G, Rahmstorf S. On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth. Geophys Res Lett, 2010, 37, L05707, doi:10.1029/2010GL042710.
- [115] Chandra S, McPeters R D. The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites. J Geophys Res, 1994, 99: 20665-20671.
- [116] Lean J, Rottman G, Kyle H, Woods T, Hickey J, Puga L. Detection and parameterization of variations in solar mid - and near - ultraviolet radiation (200-400 nm). J Geophys Res, 1997, 102(D25), 29939-29956.
- [117] Harder J W, Fontenla J M, Pilewskie P, et al. Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared. Geophys Res Lett, 2009, 36, L07801, doi:10.1029/2008GL036797.
- [118] Lockwood M. Was UV spectral solar irradiance lower during the recent low sunspot minimum? J Geophys Res, 2011, 116, D16103, doi:10.1029/2010JD014746.
- [119] Haigh J D, Winning A R, Toumi R, et al. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. Nature, 2010, 467: 696-699, doi: 10.1038/nature09426.
- [120] Cahalan R F, Wen G, Harder J W, Pilewskie P. Temperature responses to spectral solar variability on decadal time scales. Geophys Res Lett, 2010, 37, L07705, doi:10.1029/2009GL041898.
- [121] Merkel A W, Harder J W, Marsh D R, Smith A K, Fontenla J M, Woods T N. The impact of solar spectral irradiance variability on middle atmospheric ozone. Geophys Res Lett, 2011, 38, L13802, doi:10.1029/2011GL047561.
- [122] Haigh J D. The Sun and Earth 's Climate, Living Rev. Solar Phys, 4, lrsp-2007-2, <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2007-2/>, last access: 30 March 2011, 2007.
- [123] Wuebbles D J, Wei C F, Patten K O. Effect on stratospheric ozone and temperature during the Maunder Minimum. Geophys Res Lett, 1998, 25: 523-526.
- [124] Larkin A, Haigh J D, Djavidnia S. The effect of solar UV irradiance variations on the Earth' s atmosphere. Space Sci Rev, 2000, 94: 199-214.
- [125] Haigh J D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. Nature, 1994, 370: 544-546, doi:10.1038/370544a0
- [126] Frame T H A, Gray L J. The 11 - year solar cycle in ERA - 40 data: An update to 2008. J Clim, 2010, 23: 2213-2222, doi:10.1175/2009JCLI3150.1.
- [127] Haigh J D. The effects of solar variability on the Earth's climate. Philos Trans R Soc London Ser A, 2003, 361: 95-111, doi:10.1098/rsta.2002.1111.
- [128] Kushner P J, Polvani L M. Stratosphere - troposphere coupling in a relatively simple AGCM: Impact of the seasonal cycle. J Clim, 2006, 19: 5721-5727, doi:10.1175/JCLI4007.1.
- [129] Haigh J D, Blackburn M. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. Space Sci Rev, 2006, 125: 331-344, doi:10.1007/s11214-006-9067-0.
- [130] Shindell D T, Schmidt G A, Miller R L, Rind D. Northern Hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and volcanic forcing. J Geophys Res, 2001, 106, 7193-7210, doi:10.1029/2000JD900547.
- [131] Solomon S, Crutzen P J, Roble R G. Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere: 1. Odd nitrogen from 50 to 120 km. J Geophys Res, 1982, 87: 7206-7220, doi:10.1029/JC087iC09p07206.
- [132] Jackman C H, et al. Short - and medium - term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. Atmos Chem Phys, 2008, 8: 765-785, doi:10.5194/acp-8-765-2008.
- [133] Funke B, López - Puertas M, Gil - López S, et al. Downward transport of upper atmospheric NOx into the polar stratosphere and lower mesosphere during the Antarctic 2003 and Arctic 2002/2003 winters. J Geophys Res, 2005, 110, D24308, doi:10.1029/2005JD006463.
- [134] Ney E P. Cosmic radiation and the weather. Nature, 1959, 183: 451-452, doi:10.1038/183451a0.
- [135] Dickinson R E. Solar variability and the lower atmosphere. Bulletin of the American Meteorological Society, 1975, 56(12): 1240-1248.
- [136] Svensmark H, Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray

- flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59 (11): 1225-1232.
- [137] Tinsley B A, Rohrbaugh R P, Hei M, et al. Effects of image charges on the scavenging of aerosol particles by cloud droplets and on droplet charging and possible ice nucleation processes. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 2118-2134.
- [138] Zhou L, Tinsley B A. Production of space charge at the boundaries of layer clouds. *J Geophys Res*, 2007, 112, D11203, doi:10.1029/2006JD007998.
- [139] Tinsley B A, Rohrbaugh R P, Hei M. Electroscavenging in clouds with broad droplet size distributions and weak electrification. *Atmos Res*, 2001, 59-60: 115-135, doi:10.1016/S0169-8095(01)00112-0.
- [140] Khain A, Arkhipov V, Pinsky M, et al. Rain enhancement and fog elimination by seeding with charged droplets. Part I: Theory and numerical simulations. *J Appl Meteorol*, 2004, 43: 1513-1529, doi:10.1175/JAM2131.1.
- [141] Evan A T, Heidinger A K, Vimont D J. Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L04701, doi:10.1029/2006GL028083.
- [142] Brown B H. Short-term changes in global cloud cover and in cosmic radiation. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2008, 70(7): 1122-1131, doi:10.1016/j.jastp.2008.02.003.
- [143] Harrison R G, Stephenson D B. Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds. *Proc R Soc A*, 2005, 462: 1221-1233, doi:10.1098/rspa.2005.1628.
- [144] Svensmark H, Bondo T, Svensmark J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L15101, doi: 10.1029/2009GL038429.
- [145] Sun B, Bradley R S. Solar influences on cosmic rays and cloud formation: A reassessment. *J Geophys Res*, 2002, 107(D14), 4211, doi:10.1029/2001JD000560.
- [146] Sloan T, Wolfendale A W. Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover. *Environ Res Lett*, 2008, 3, 024001, doi:10.1088/1748-9326/3/2/024001.
- [147] Kristjánsson J E, Stjern C W, Stordal F, Fjaeraa A M, Myhre G, Jonasson K. Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds—A reassessment using MODIS data. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(24): 7373-7387.
- [148] Calogovic J, Albert C, Arnold F, Beer J, Desorgher L, Flueckiger E O. Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L03802, doi:10.1029/2009GL041327.

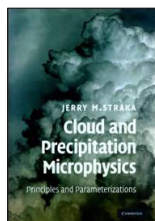
## 新书架

### NEW BOOK

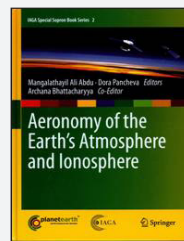
感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆阅览室阅读或凭索书号借阅



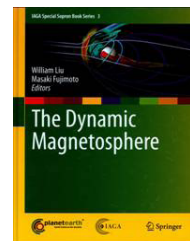
Geosphere-Biosphere Interactions and Climate  
《地圈—生物圈的相互作用及气候》  
编著者: Lennart O. Bengtsson等  
出版者: Cambridge University Press  
出版年: 2010



Cloud and Precipitation Microphysics  
《云和降水的微观物理学》  
编著者: Jerry M. Straka等  
出版者: Cambridge University Press  
出版年: 2011



Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere  
《高层大气物理学——地球大气层和电离层》  
编著者: Mangalathayil Ali Abdu等  
出版者: Springer  
出版年: 2011



The Dynamic Magnetosphere  
《磁层动力学》  
编著者: William Liu等  
出版者: Springer  
出版年: 2011

# 空间天气领域文献计量指标分析

胡英 张萌

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 基于SCI-E和CNKI学术期刊数据库, 运用文献计量学方法, 针对国内外发表的空间天气主题论文进行统计分析, 给出该领域各种计量指标, 并对结果进行讨论和分析。

**关键词:** 空间天气, SCI-E, CNKI, 文献计量, 指标分析

## Bibliometric Analyses on the Field of Space Weather

Hu Ying, Zhang Meng

(CMA Training Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** Based on the SCI-E and CNKI databases, China and world outputs of scientific papers in the space weather field are analyzed using the bibliometric method. The evolution of the field is described in terms of the number and impact of the published papers, as well as the rankings and hot spots in the field.

**Key words:** space weather, SCI-E, CNKI, bibliometrics, index analyses

### 1 引言

科技论文的产出和被引用频次标志着一个国家的科研水平和其所代表的科研成果的影响力, 利用文献计量指标数据可以从一个侧面描绘出一个国家或地区科技发展的宏观状态, 进而也可以从宏观到微观对科研机构、高等院校、学科领域、科学研究者科技论文产出力和影响力及其分布情况和合作状况进行客观的统计和描述。通过对计量指标的分析研究, 科研和业务人员、科研管理者和科研政策制定者还可以了解学科领域发展的历史和现状, 把握学科发展趋势和研究热点, 揭示不同学科领域的交叉与融合, 展示各学科领域及研究机构和科学家的科研成果及分布情况, 从而更加科学地制定研究发展目标, 更好地促进科研交流和学术发展<sup>[1]</sup>。

本文运用文献计量学方法, 针对国际与中国空间天气领域科技论文计量指标进行统计与分析, 力图通过指标量化数据客观描述国内外空间天气研究领域的历史发展沿革与发展现状。

### 2 数据来源与统计方法

利用ISI Web of Science平台的SCI-E (SCI扩展网络版, 以下简称SCI) 数据库, 检索数据年限为所有年代 (即1900—), 检索模式为主题字段, 检索表达式为Topic=“space weather”, 文献类型包括期刊论文和综述论文, 检索数据更新时间截止到2011年10月21日, 部分内容在2011年11月进行了补充检索。利用ISI Web of Science平台强大的分析功能, 对检索命

中文献细化分析, 分别得到SCI学科论文发表年代分布、学科分布、国家和机构的论文产出排名、刊载期刊排序和被引频次最高的热门论文, 以及中国SCI学科论文属性特征等统计数据。通过引文分析报告, 对论文产出国家和机构的总被引频次、篇均引用次数进行统计与排序, 由此给出国际空间天气主题论文主要产出国家和国内外主要产出机构的影响力排名。

针对中国在空间天气领域发表论文的统计, 利用中国知网 (以下简称CNKI) “中国学术期刊网络出版总库”。该数据库具有检索功能强大、涵盖范围广、资源综合性强、标引详细等特点, 并在二次加工基础上提供增值服务<sup>[2]</sup>。选择CNKI学术期刊库中1915—2011年的全部期刊论文为数据源, 检索主题为“空间天气”, 检索截止日期为2011年10月25日。对检索命中文献再分别按被引频次、发表年度、学科类别、期刊名称、文献作者及单位等指标特征进行统计分析。

### 3 统计结果与比较分析

#### 3.1 论文数量与产出年代分布及学科分布

检索得到SCI空间天气主题论文1471篇, 其中气象和大气科学类论文676篇; 中国SCI空间天气主题论文93篇, 其中气象和大气科学类论文14篇; 中国国内发表CNKI空间天气相关学科论文317篇, 其中气象学论文46篇。

图1给出空间天气领域SCI全学科、SCI气象和大气科学、SCI中国全学科、SCI中国气象和大气科学以及CNKI收录的空间天气主题论文发表年代分布情况。统计数据显示, 空间天气是一门年轻且正在迅速崛起的学科, 国内外均起步较晚<sup>[3, 4]</sup>。1995年以前, SCI空间天气主题论文每年发文量只有1篇左右,

收稿日期: 2011年10月11日; 修回日期: 2011年11月16日

第一作者: 胡英 (1958—), Email: huying@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象局气象软科学面上项目 [2012] 第034号

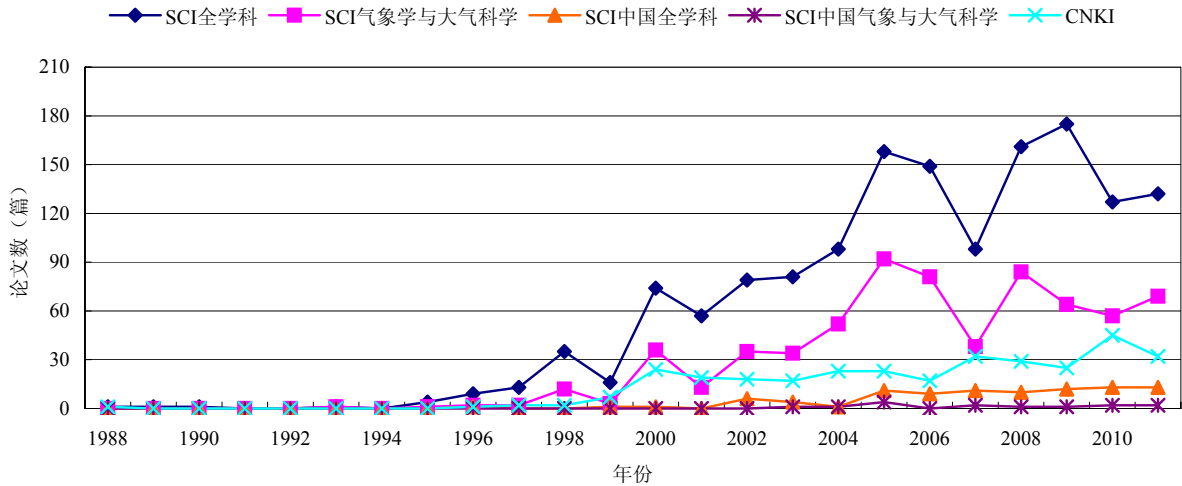


图1 SCI、CNKI空间天气主题论文发表年代分布

1995年为4篇，其中大气科学类论文1篇，以后逐年波段式振荡增长。2000年出现第一次跳跃增长，全学科和大气科学类论文分别达到74和36篇；2005年出现第二次明显增长，全学科和大气科学类论文分别达到158篇和92篇，较之2000年论文数均增长了一倍多，且近7年来SCI学科论文总体呈现振荡上升趋势。中国空间天气主题论文于1996年开始进入SCI，从2005年起保持每年发表10余篇，增长趋势与国际基本同步。

CNKI收录空间天气主题论文从2000年起明显增加，到2010年达到45篇。

表1分别给出SCI、CNKI空间天气论文前9个学科的论文分布。SCI空间天气主题论文中天文学和天体物理学类论文排在第一位（937篇），占论文总数63.7%，气象和大气科学类论文（676篇、占46.0%）排在第二位，排在第三和第四位的学科分别是地球化学与地球物理学（430篇、占29.3%）和地质学（411篇、占28.0%）。

CNKI空间天气论文排在前三位的学科分别是地球物理学（97篇、占30.6%）、天文学（76篇、占23.9%）和气象学（46篇、占14.5%），合计约占论文总数69%。空间天气是典型的多学科交叉领域<sup>[3, 4]</sup>，

表1 SCI、CNKI空间天气主题论文前9个学科分布

SCI学科			CNKI学科	
序号	学科类别	论文数 (篇)	学科类别	论文数 (篇)
1	天文学和天体物理学	937	地球物理学	97
2	气象和大气科学	676	天文学	76
3	地球化学和地球物理学	430	气象学	46
4	地质学	411	航空航天科学与工程	30
5	工程学	295	地质学	21
6	物理学	70	自然地理学和测绘学	11
7	遥感	37	仪器仪表工业	7
8	通讯	31	计算机软件及计算机应用	5
9	科学技术其它主题	29	科学研究管理	5

在许多主流学科中均有渗透。在学科分布上，国内外存在较大不同。SCI学科论文中空间天气与气象和大气科学交叉更多，其论文数量位居第二，地球化学和地球物理学排在第三位。而在国内，与地球物理学交叉的论文数量位居第一，气象学排在第三。这一方面说明气象科学无论在国际上还是国内，均是空间天气领域最主要的渗透学科之一；另一方面也表明，国际上气象和大气科学在空间天气领域成为主导学科的趋势，很可能快速影响国内本领域的学科分布形势。

### 3.2 论文产出国家与机构及其影响力分析

高质量的SCI论文产出及被引指标已被国际科技界广泛用于评价一个国家或地区、机构及科研人员科研产出力及其影响力的客观指标。

表2、表3分别给出SCI空间天气全学科论文前10个国家与气象和大气科学论文前15个国家的产出与影响力排名。可以看出，美国、俄罗斯和英国论文产出排名稳定在前3位，美国各项指标又远远高于其他国家，论文产出量分别占论文总数的50.3%和48.8%，总被引频次分别是第二位日本和第三位英国的9倍和

表2 SCI空间天气主题论文产出前10个国家排名

序号	国家/地区	论文数 (篇)	占百分比	总被引频次 (排名)	篇均引用次数 (排名)
1	美国	739	50.3	13170(1)	17.82(1)
2	俄罗斯	143	9.7	1080(6)	7.55(7)
3	英国	116	7.9	1407(3)	12.13(5)
4	法国	99	6.7	1339(4)	13.53(4)
5	日本	94	6.4	1453(2)	15.46(2)
6	中国	93	6.3	443(8)	4.76(10)
7	德国	87	5.9	1269(5)	14.59(3)
8	意大利	70	4.8	365(10)	5.21(9)
9	芬兰	67	4.6	701(7)	10.46(6)
10	印度	59	4.0	385(9)	6.53(8)

表3 SCI空间天气主题论文在气象和大气科学学科论文产出前15个国家排名

序号	国家/地区	论文数(篇)	占百分比	总被引频次(排名)	篇均引用次数(排名)
1	美国	330	48.8	3526(1)	10.68(3)
2	俄罗斯	68	10.1	339(6)	4.99(12)
3	英国	52	7.7	470(2)	9.04(4)
4	日本	44	6.5	380(5)	8.64(6)
5	德国	41	6.1	456(4)	11.12(2)
6	芬兰	34	5.0	466(3)	13.71(1)
7	法国	34	5.0	191(9)	5.62(9)
8	意大利	33	4.9	174(10)	5.27(11)
9	巴西	32	4.7	266(7)	8.31(7)
10	加拿大	32	4.7	203(8)	6.34(8)
11	比利时	20	3.0	94(13)	4.70(13)
12	希腊	18	2.7	96(12)	5.33(10)
13	印度	18	2.7	82(14)	4.56(14)
14	澳大利亚	15	2.2	133(11)	8.87(5)
15	中国	14	2.1	28(15)	2.00(15)

9.36倍。日本学科论文在影响力方面表现突出，而俄罗斯论文的影响力排名远落后于产出排名。中国全学科论文93篇（第6位），总被引频次443次（第8位）；中国气象和大气科学类论文14篇（第15位），总被引频次28次（第15位）。另外芬兰在论文产出与影响力的排名均跻身前10国，值得关注。

表4、表5分别给出SCI全学科论文前11个机构与气象和大气科学类论文前12个机构的产出与影响力排名。可以看出，美国研究机构和大学的论文产出和影响力排名分别占居前4和前3位，占有绝对优势。中国有关空间天气领域研究的机构只有中国科学院（66篇、居第5位）榜上有名，俄罗斯科学院全学科论文（62篇）居第6位，两机构的影响力排名分别为第11和第10位；芬兰气象学院对学科论文贡献较为突出，产出排名分别为57篇（第8位）和30篇（第4位），

表4 SCI空间天气主题论文产出前11个机构排名

序号	机构	论文数	占百分比	总被引频次(排名)	篇均引用次数(排名)
1	NASA	140	9.5	2768(1)	19.77(4)
2	密歇根大学	84	5.7	1337(4)	15.92(7)
3	科罗拉多大学	74	5.0	1418(3)	19.16(5)
4	NOAA	69	4.7	1891(2)	27.41(2)
5	中国科学院	66	4.6	299(11)	4.67(11)
6	俄罗斯科学院	62	4.2	479(10)	7.73(10)
7	约翰斯霍普金大学	60	4.1	735(8)	12.25(8)
8	芬兰气象学院	57	3.9	492(9)	8.63(9)
9	美国空军	54	3.7	902(7)	16.70(6)
10	加州大学伯克利分校	44	3.0	1082(6)	24.59(3)
11	美国海军	43	2.9	1289(5)	29.98(1)

注：NASA：美国国家航空航天局，NOAA：美国国家海洋和大气局

表5 SCI空间天气主题论文在气象和大气科学学科论文产出前12个机构排名

序号	机构	论文数	占百分比	总被引频次(排名)	篇均引用次数(排名)
1	NASA	69	10.2	474(3)	6.87(9)
2	科罗拉多大学	49	7.2	807(1)	16.47(2)
3	NOAA	33	4.9	584(2)	17.70(1)
4	芬兰气象学院	30	4.4	279(5)	9.30(4)
5	俄罗斯科学院	26	3.8	75(12)	2.88(12)
6	美国空军	26	3.8	224(6)	8.62(6)
7	密歇根大学	22	3.3	186(7)	8.45(7)
8	波士顿大学	20	3.0	325(4)	16.25(3)
9	约翰斯霍普金大学	19	2.8	107(10)	5.63(11)
10	加州大学洛杉矶分校	16	2.4	129(8)	8.06(8)
11	卢瑟福阿普尔顿实验室	15	2.2	96(11)	6.40(10)
12	美国国家大气研究中心	14	2.1	125(9)	8.93(5)

影响力排名分别为第9位和第5位。另外中国SCI学科论文主要贡献机构还有中国科学技术大学13篇、北京大学11篇、南京大学6篇和中国气象局5篇（详见表7）。综上总体来看，发射过卫星的国家在空间天气领域的研究比较占优势。

### 3.3 刊载期刊与热门论文分析

表6给出刊载SCI空间天气主题论文大于20篇、CNKI主题论文大于6篇的来源期刊排序。对比发现，刊载CNKI论文的刊物还大多集中在地学领域和基础科学领域。这也从侧面反映了表1所示的结论——国内外空间天气主题论文分布的主要学科不同。SCI和CNKI被引频次最高的热门论文分别在本期P3、P5页的榜单中给出<sup>[5]</sup>。

### 3.4 中国空间天气主题论文特征分析

表7给出中国SCI论文的主要国际合作状况分析，中国与美国合作（33篇）最为密切，占全部论文的

表6 SCI和CNKI空间天气主题论文来源期刊分布

序号	SCI		CNKI	
	来源出版物	论文数(篇)	来源出版物	论文数(篇)
1	Advances in Space Research	220	空间科学学报	37
2	Space Weather	190	地球物理学报	23
3	Journal of Geophysical Research-Space Physics	182	中国科学：地球科学	20
4	Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics	159	中国科学：数学	17
5	Annales Geophysicae	62	地球物理学进展	11
6	Solar Physics	58	科学通报	8
7	Geophysical Research Letters	50	Science China Technological Sciences	8
8	Space Science Reviews	44	中国科学院院刊	7
9	Astrophysical Journal	42	天文学进展	7
10	Radio Science	31	中国基础科学	6
11	IEEE Transactions on Plasma Science	25	地球科学进展	6

表7 中国SCI空间天气主题论文的主要合作国家/地区分布

序号	国家/地区	论文数(篇)	占百分比
1	美国	33	35.5
2	德国	5	5.4
3	台湾	4	4.3
4	法国	3	3.2
5	加拿大	2	2.2
6	英国	2	2.1
7	日本	2	2.1

35.5%，其次是德国（5篇）和中国台湾（4篇）。从表8可看出中国SCI空间天气主题论文主要产出机构分布和论文学科比例，以及机构间的国际合作状况。与中国机构间合作最多的是美国阿拉巴马大学（9篇）和密歇根大学（6篇），另外合作4篇的机构还有NASA、麻省理工学院和EXPI公司。

表9给出CNKI空间天气主题论文产出3篇以上的20个机构排名。中国科学院空间科学与应用研究中心73篇，以较大优势排在第一名，其他中科院下属研究机构也是论文主要产出机构；中国气象局论文20篇，位列第2名，大学中排在前列的是中国科学技术大学（14篇、第3名）和北京大学（13篇、并列第4名），广州市气象卫星地面站与南京大学共为7篇，并列第7名。

表8 中国SCI空间天气主题论文主要产出机构分布

序号	机构	全学科/大气科学论文数(篇)	占百分比
1	中国科学院	66/11	68.9
2	中国科学技术大学	13/1	14.0
3	北京大学	11/4	10.8
4	阿拉巴马大学	9/0	9.7
5	南京大学	6/0	6.5
6	密歇根大学	6/0	6.5
7	中国气象局	5/2	5.4
8	EXPI公司	4/0	4.3
9	麻省理工学院	4/0	4.3
10	NASA	4/0	4.3

#### 4 结果讨论及思考

(1) 国际上SCI空间天气主题论文数量从1995年开始呈现波段式增长，其中气象和大气科学类论文从2000年起增长明显，二者近年来都呈现4年的周期性波动。中国SCI论文被收录较晚，从2002年起开始振荡增长，国内CKNI收录的学科论文从2000年起快速增长，并且国内外空间天气主题论文的增长趋势基本同步。中国在空间天气研究领域属后起者，近7年学科论文产出有明显增长，但其研究投入和其影响力还需增强。

(2) 美国在SCI空间天气主题的论文产出量及总被引次数，无论是全学科还是精细到气象学和大气科学，都位居第一，且远远超过产出排名第二的俄罗斯

表9 CNKI空间天气主题论文产出前20个机构排名

排名	机构	论文数
1	中国科学院空间科学与应用研究中心	73
2	中国气象局	20
3	中国科学技术大学	14
4	中国科学院国家天文台	13
4	北京大学	13
5	中国科学院地质与地球物理研究所	9
6	中国科学院武汉数学与物理研究所	8
6	中国科学院研究生院	8
7	南京大学	7
7	广州市气象卫星地面站	7
8	中国地震局地球物理研究所	6
9	武汉大学	5
10	中国科学院地球物理研究所	4
10	中国科学院上海天文台	4
10	中国科学院紫金山天文台	4
10	国家自然科学基金委员会地球科学部	4
11	国家自然科学基金委员会	3
11	中国地质大学(北京)	3
11	中国电子科技集团中国电波传播研究所	3
11	中国科学院	3

和影响力排名第二的日本，其论文产出量已占据了空间天气领域的半壁江山，总被引次数和篇均引用次数远远高于其他国家。机构排名中美国机构的进榜数量及论文产出量和影响力也位居第一。中国机构仅有中国科学院进入前20，且论文影响力排名落后于论文产出量排名。

(3) 空间天气研究在中国处于起步阶段，参与的部门主要分布在中科院系统的航天、天文、地球科学和基础研究的研究所、大学及业务部门，华裔科学家的贡献也占一定的比例。中国气象局要提高在空间天气领域的业务创新能力还需加强这一领域的研究，更广泛地开展科研合作。

(4) 中国气象局图书馆对于刊载空间天气论文的期刊收录不多，从排名前20的热门期刊看，文献保障率不足50%，今后还应注重提高该领域的文献保障水平。

#### 参考文献:

- [1] 胡英,王卫丹,贾朋群. 中国与世界大气科学及相关领域科技论文指标分析. 气象科技进展, 2011, 1(1): 49-51.
- [2] 李金兰. CNKI、万方、维普资源比较与分析. 情报探索, 2011, (4): 59-61.
- [3] 王劲松. 中国气象局的空天气业务. 气象科技进展, 2011, 1(4): 6-12.
- [4] 郭建广, 张效信. 国际上的空间天气计划与活动. 气象科技进展, 2011, 1(4): 18-25.
- [5] 中国科学院国家科学图书馆科学前沿分析中心. 中国热点论文榜. Science Focus, 2008, 3(5).

# 关于我国空间天气保障能力发展战略的一些思考

■ 魏奉思

**空间天气灾害是人类要面对的一种非传统的自然灾害**

**什么是空间天气**

千百年来,人们就知道狂风暴雨、洪涝、干旱这些地球上的灾害性天气会给人类的生活、生产和军事等活动带来重要影响。近20年来空间科学的成就表明:在地球对流层之上2~30千米到千万千米的空间,这个地球的“第四环境”的状态,因太阳活动将巨大的能量和物质抛向空间形成所谓的太阳风暴吹袭地球时,常引起地球的电磁辐射、带电粒子、中性大气、等离子体环境发生急剧变化,有时致使卫星失效乃至陨落,通信受干扰乃至中断,导航定位跟踪失误,灾害监测、抢险救灾受阻,金融、贸易受损,油气输运、电力系统损坏以及人类健康和生命受到严重危害。科学家将这种突发性的、急剧变化的条件或状态与地球天气类比,形象地称之为“空间天气”(space weather)。“空间天气”一词出现于20世纪70年代前后、流行于90年代中期美国提出“国家空间天气计划”之后。由于空间天气常给航天、通信、导航、电力、人类健康以及国家安全等有关国家利益的领域带来严重危害和巨大损失,越来越引起有关政府、产业界、科技界和军事部门的高度重视。例如美国宇航局根据美国总统令制定的2006—2016年的战略计划中把空间天气作为一个重要的战略目标,特别指出“空间天气对人类的危害越来越明显,因此认识并降低空间天气对人类的危害效应迫在眉睫”。鉴于人类社会的发展越来越离不开空间技术系统的安全运行,一门旨在专门监测、研究、建模、预报空间天气变化及其效应,减轻或防止空间灾害,为人类空间安全“保驾护航”的新兴科学领域——空间天气学“在人类跨世纪的步伐中应运

而生”,并迅速成为关系人类社会发展的一项空间天气事业。它的学科基础是空间物理学,研究的是空间环境中最富神奇变幻、对地基、地基技术系统最具危害性的那些突发性的、短时间尺度的、高度动态易变的天气变化及其对技术系统的影响,它是空间物理学进入科学与应用紧密结合发展新阶段的标志。中国正向创新型国家迈进,中国应成为有空间天气知识和保障能力的国家。

**空间天气灾害**

空间天气变化所引起的灾害称之为空间天气灾害,它是一种非传统的、主要源自太阳活动的自然灾害,而且在太阳活动峰年期间发生的频次和强度都大为增加,这是1990年代才开始被认识的新事实。

早在1859年9月发生过一次超强太阳风暴吹袭地球,曾记录到地磁暴指数Dst $\approx$ -1760 nT,加拿大、美国、法国、英国等报导电报通信受严重干扰与出现极光有关。但是作为一种科学认识,那是近一个半世纪之后的事。第21周太阳活动峰年期间1989年3月一次太阳风暴吹袭地球,引起强磁暴(Dst=-589 nT),致使太阳峰年科学卫星提前陨落,大约6000个空间目标跟踪丢失,低纬无线电通信几乎完全中断,轮船、飞机的导航系统失灵,磁法控制姿态发生困难,加拿大魁北克输电系统烧坏,使600万居民停电9小时之久,许多卫星上指令系统受干扰甚至失效或永久损坏,航天员和高空飞机乘客遭受危险辐射剂量等。这次事件震惊了国际社会!事实上,这种灾害性天气事件,近20年已发生过十几次。若遇更为猛烈几倍的超强太阳风暴吹袭地球,会是什么情景呢?正如美国国家科学院2009年1月发布的一份特别报告所警告的,它可能会引发一次严重的地球灾难。在约90秒时间内,美国

东部地区将停电,卫星信号中断,随之而来的是供水、污水处理、物流、金融、高速、运输、医院等国家基础设施将濒于崩溃。经济损失预计第一年可达1~2万亿美元,需4~10年恢复。美国科学家大声疾呼:“由于出现的可能性微乎其微,全社会根本没将其考虑在内,而只是关心眼前的事”,“人类社会还远未做好应对准备”。超强太阳风暴吹袭地球引起的空间天气大灾害,如同源于地球活动的大地震、大海啸一样,都是人类要面对的突发性的、难于预测的低概率/高风险的重大自然灾害。我国应如何从战略高度加以积极应对呢?这向我们政府和有关部门提出了一个颇具挑战性的决策难题。印尼海啸、中国四川汶川地震、日本仙台地震等的教训应当吸取!

**国际社会认真应对可能发生的空间灾害性天气**

通过美国空间天气科学家们的呼吁,美国等国和一些国际组织正从加强监测、预警、提升认知水平、风险评估、减灾防灾、国际合作等多方面应对可能发生的空间天气灾害,例如:

●美国航空航天局(NASA)根据总统令制定十年(2007—2016年)战略计划,空间天气作为重要的战略目标之一,执行具有前瞻性的太阳—太阳系观测大平台战略计划;

●美国航空航天局(NASA)计划发射一组“飞船空间天气站”,由五个卫星计划组成,已于2008年2月发射太阳动力学卫星(SDO)监测太阳活动,正紧盯空间天气变化;

●美国白宫2010年6月评估、批准制定新的第二个国家空间天气十年计划,着手建设有空间天气知识和保障能力的国家;

●美国减灾委员会于2008年把空间天气灾害纳入美国重大减灾挑战的十年计划;

●欧空局制定空间态势认知十年计划，三大主题是：地球轨道目标的监视与跟踪、空间天气、近地物体；

●联合国关注空间天气，2009年起支持“国际空间天气起步计划”，协调全球的空间天气监测与研究等活动；

●世界气象组织（WMO）认识到空间天气对气象基础设施和人类活动有相当大的影响，并预计在即将来到的太阳活动周中这种影响将会增加，应加强气象与空间天气服务之间的协调，于2010年成立以中国气象局国家空间天气监测预警中心和美国大气海洋局空间天气预报中心为联合主席单位的空间天气协调小组。

### 国际发展态势

#### 空间天气科学正成为世界范围关注的科技活动热点之一

●世界范围诸多国家相继制定空间天气起步计划。从1995年美国实施国家空间天气十年计划开始，欧空局、法国、德国、英国、俄罗斯、加拿大等许多国家相继制定空间天气起步计划；美国宇航局的十年战略计划（2007—2016年），其战略任务之一将实施日—地关系大观测台计划，安排近二十颗卫星监测、研究空间天气变化，建立空间天气保障体系，保障载人和非载人空间活动的安全。

●规模宏大的国际空间天气计划相继提出和实施。围绕日地系统空间天气整体变化过程这一前沿科学问题，过去十年国际科联所属日地物理委员会组织实施“日地系统气候和天气”计划（Climate & Weather of the Sun-Earth System）。目前，美国宇航局牵头、世界众多国家参加的“国际与太阳同在”（International Living with a Star）计划是一个“聚焦空间天气、由应用驱动的研究计划”，规模空前宏大，将在太阳附近和整个日地系统配置二十余颗卫星。它的目的是：“科学地了解把日地空间联结为一个系统、对人类生存与发展有直接

影响的科学前沿问题，把获得的知识应用到将来地基、天基技术系统的设计和防护”。我国“夸父”卫星计划已参加该计划，预期将做出具有核心价值的重要贡献。

●人们关注空间天气的视野正向广度和深度延伸。在广度上，一系列空间探测计划向太阳系的火星、金星、水星、土星、木星等深空进军，登月成为诸多国家新的竞争舞台。空间天气探测、研究与预报也从日地系统扩展到整个太阳系，“开辟人类在太阳系中的新疆界”。在深度上，除已发射的Cluster、Hinode、THEMIS、SOHO、ACE、TRACE、我国地球“双星”和太阳动力学观测站（SDO）等探测计划外，针对日地系统空间天气整体变化中的关键科学问题还将实施一系列卫星计划，甚至将于2015年后发射飞到离太阳只有几个太阳半径处的太阳探测器（Solar Probe）等卫星去揭示空间天气变化的科学之谜。

#### 空间天气保障能力成为增强国家综合实力的新竞争点

未来十年，随着人类社会的发展越来越依赖空间技术，上千颗卫星将在空间运行，空间技术将成为惠及一切事、一切人的普及的高技术。发展航天、信息等空间高科技产业关系国家核心利益。空间是无国界的第四疆域，人们关于国家安全的概念已从领海、领空和领土安全拓展到空间安全，空天军事化趋势在发展。此外，空间天气也密切关系国家电磁安全、海洋权益和战略预警安全等。美国政要认为“空间系统是我们的安全、社会和经济的的重要组成部分”。欧洲空间局的空间天气计划特别强调它对提高欧洲工业、军事、技术和科学独立性的战略利益以及在经济、科技和教育方面利益的重要性。在这种态势下，减轻或避免空间天气对技术系统、空间活动和国家太空安全影响和破坏的保障能力建设，将成为增强国家综合实力的一个新竞争点。

#### 目前人类关于空间天气预报的能力十分有限

空间天气预报能力是对空间天气的监测能力、变化过程和规律的认知能力，以及在此基础上的建模能力和预报技术等多方面能力的一种综合。目前空间天气的预报水平相当于地球天气1960年代的水平，对极端空间天气事件的预报能力还处于非常初级的状态。正如美国空间天气委员会主席丹尼尔·贝克教授所指出的，“我们目前还无法提前准确地预测太阳风暴的时间和强度，我和同事们所能预知的只是一旦超强太阳风暴来袭，我们根本无力应对”。如何提高预报能力，主要取决于对日地系统空间天气的探测能力的进步、认知水平的提升以及集成建模、预报技术的进展，这是一个逐步逼近真理性认识的过程，需要人们长期坚持不懈的去求索。

#### 我们面临的挑战

中国建设创新性国家，进入空间、认识空间、利用空间、拥有空间的能力是一个重要标志。夯实基础空间天气，提升认知和预报空间天气水平，降低空间天气灾害的危害，我们面临严峻挑战。

#### 实现从空间大国向空间强国的转变

航天、信息是国家“支柱”产业，大国承载的政治、经济、军事、外交等全球活动日益增多，将有上百颗卫星上天服务。航天故障40%来自空间天气，恶劣的空间天气将使空间技术系统受到严重影响，甚至是毁灭性灾难。空间技术系统的长寿命、高可靠性、安全有效运行成为当今建设空间强国的“瓶颈”。因此，为突破“瓶颈”提供空间天气的科学基础和支撑，面临严峻挑战。这也是空间强国的一个重要标志。

#### 实现空间天气研究从跟踪模仿向原始创新转型的跨越式发展

当今人类的知识体系正从地球的实验室向空间的宇宙实验室扩展。空间天气主要涉及在地球上无

法模拟的、空间无碰撞系统中的高真空、高温、高电导率、高辐射、微重力等特殊环境，地球上传统的以碰撞为基础的知识体系，诸如相互作用、扩散、传导和能量转化等理念受到挑战，急需发展新的科学概念和基础理论，把人类的知识体系从碰撞系统向无碰撞系统拓展。这些新知识不仅代表人类科学的进步，还将为减轻或规避空间天气灾害提供知识和预报能力、更为和平利用空间做出重大贡献。加速实现空间天气研究向原始创新转型，面临严峻挑战。这也是创新型国家的一种重要能力。

### 国家空间安全急需提升空间天气认知水平

所有进入空间的军事技术系统如卫星和导弹等的轨道、姿态、通信、导航定位、跟踪、材料、电子器件、星上计算机、太阳能电池和航天员健康，以及高技术战争和军事活动的所有任务领域等都受到空间天气影响，有时甚至是毁灭性的灾难。因此，在没有空间安全就没有领空、领土和领海安全的今天，建设海、陆、空、天的无缝隙保障体系，特别是临近空间的空天一体化的安全保障体系，急需提升空间天气认知水平，急需快速提升其监测与预警能力，面临严峻挑战。这也是当前欧美有关国家正在追求的一个重要战略目标。

### 有效应对空间天气灾害迫在眉睫

当强太阳风暴吹袭地球时，地球空间天气环境会发生急剧的突变，这将给我国的载人航天，探月工程、“北斗”导航，以及通信、对地观测等带来严重的影响和威胁，甚至会对我国高压电网、雷达系统及其国家基础设施产生影响。若发生百年不遇的超强太阳风暴，甚至会引发严重地球灾害。目前我们关于空间天气的认知水平和预测能力十分有限，要有效应对空间天气灾害，面临严峻挑战。这也是国际上高度关注基础空间天气的根由。

上述挑战表明：夯实基础空间天

气成为对国家发展有全局、现实和长远影响的重要而紧迫的战略需求。

### 中国的进步

我国的空间天气研究，与美国1990年代初提出国家空间天气计划大体同步，经过近十多年的快速发展，从一个三流国家跃升为二流国家前列，开始站到国际科学前沿，正鼓着劲从跟踪模仿向自主原创、引领发展转型；同时，我国空间天气业务也开始逐渐形成体系，取得了可喜成绩。主要表现如：

●天基卫星探测获国际大奖。我国自主研发的第一个科学卫星《地球空间双星探测》与欧空局《集簇卫星(Cluster)》联合实现地球空间的六点首次探测，取得一系列原创性成果，共同获国际宇航科学院(IAA)2010年度的Laurels团队成就奖这一国际殊荣。这是航天领域的国际大奖，诸如哈勃望远镜、航天飞机、空间站等位列其中。“双星”计划也获国家2010年度科技进步一等奖。

●地基观测步入国际先进行列。1997年经国家科教领导小组批准的大科学工程——“东半球空间环境地基综合监子午链”，简称《子午工程》，2011年将全部建成验收。它是目前世界上沿地球120°E子午链经度跨度最长，集无线电、光学、地磁和探空火箭等多手段探测的综合性和先进性为一体的空间环境地基监测系统。国际科学界高度评价中国的子午工程，“无论是对中国的科学还是国际的科学都将是重要的”，“毫无疑问子午工程将激励中国科学家进入这个重要领域的前沿”。它“雄心勃勃”、“影响深远”和“令人震撼”。

●“亮点”研究如雨后春笋。首次揭示太阳风形成高度在太阳表面之上的20万千米处，是“具有里程碑意义的成果”；太阳风暴的日冕一行星际数值模式被认为是当今“国际上最好的三个模式之一”；磁重联研究为国际瞩目，如磁“零点”研究于2009和2010年连续两年

被评为欧空局“集簇”卫星的五大成果之一；揭示严重威胁地球同步通信卫星安全的“杀手”电子快速加速的机理，入选欧空局颁发的“集簇”卫星5位“杰出科学家奖”之列；太阳风暴与地球磁层相互作用的模拟研究，中国是具有这种能力的少数几个国家之一；电离层的地域特色与中高层大气的激光雷达观测研究为国际学术界瞩目；太阳活动研究与预报水平名列国际前茅，已为我国的航天安全保障做出重要贡献等。这些研究已开始产生引领其发展的影响。此外，有的实验室在国际一流刊物发表高质量科学论文的数量已赶上美国一流实验室，如我国的电离层物理实验室、地球空间环境实验室、空间天气学国家重点实验室和太阳活动物理实验室等。

●牵头国际合作，发挥引领作用。我国正以《子午工程》为基础，充分发挥我国地域优势，牵头组织沿120°E和60°W、环绕地球一圈的国家和地区实施“国际空间天气子午圈计划”，国际科学界高度评价“它将对全世界范围内空间天气研究的不断进步和发展做出重大贡献”；我国科学家牵头建议的“夸父”国际合作卫星计划，被誉为“这是中华民族在空间探测科学领域的创世纪的计划”。这些由中国科学家牵头的地基、天基计划已在组织推动中，必将对科学发展产生重要引领作用。

●空间天气业务成绩显著。空间天气业务和其他气象业务的配合可以实现从太阳到地球表面气象环境的无缝隙业务体系。2002年6月1日国务院批准中国气象局成立国家空间天气监测预警中心，标志着我国国家级空间天气业务的开始。9年来，国家空间天气监测预警中心的业务已经形成规模，在基于风云系列卫星的天基监测能力建设、基于气象台站的网络化地基监测台站建设、参考气象业务规范的预报预警系统建设以及面向用户的应用服务

探索与实践等方面取得良好成绩，在国际和国内赢得了广泛的认同和支持。目前国家空间天气监测预警中心是WMO计划间空间天气协调组联合主席单位。同时，军口也成立了专门的空间天气业务机构。此外，中国科学院和中国电子科技集团等部门在空间天气方面的应用也在快速发展中。

上述点滴介绍表明：我国空间天气科学研究是有基础，有优势，可望未来十年实现从跟踪模仿向原始创新，引领发展转型的一个重要领域；同时，我国空间天气业务也为未来十年构建我国空间天气保障体系奠定了良好基础。

### 发展战略建议的初步思考

为应对建设创新型国家面临的诸多挑战，中国科学院院士咨询委员会2007年立项进行《我国空间天气保障能力发展战略建议》研究。这里简要介绍一些初步思考。

#### 战略目标

总目标：建立我国空间天气的天、地一体化的监测、预警体系，实现我国在空间天气科学前沿、建模与预报研究以及人才队伍建设进入国际先进国家之列的跨越发展，具有不断提升应对严重空间天气灾害的基本能力，满足我国航天、通信、导航定位、目标跟踪、载人航天以及国家对空天一体化和太空安全保障等方面日益增长的需求，成为有空间天气知识和保障能力的国家。

分期目标：（1）2011—2015年：夯实基础，聚焦近地（20~1000千米）空间天气保障体系建设；（2）2016—2020年：跨进前列，建设我国地球空间天气保障体系；（3）2021—2030年：引领发展，建设日地系统空间天气保障体系。

#### 战略任务

战略任务的核心是建设精确、可靠和实时的空间天气保障体系，四项基本能力是基本的建设单元，简要介绍如下。

### ■ 发展空间天气整体变化过程的天、地一体化的监测能力

空间天气源于太阳、经由行星际空间传输、引起地球空间环境变化、最终影响人类的活动，发展这种从太阳到地球的整体变化过程的监测能力是挑战空间天气科学前沿、认识变化规律、开展建模与预报、以及进行效应分析与工程服务的观测基础。鉴于我国国情和发展态势，我国空间天气专业卫星应以系列小卫星为主，与科学卫星、应用卫星搭载形成配合；地基观测以建设空间天气地基综合监测网为主。预期经过5、10、20年努力，按三个不同的空间区域：近地空间、地球空间和日地空间系统，分阶段建设天、地一体化的空间天气综合监测体系。

### ■ 提升空间天气科学前沿的自主创新能力

研究日地系统中有关空间天气发生、发展的基本过程和变化规律中的前沿科学问题，把人类的知识体系从碰撞系统到无碰撞系统拓展，以实现由跟踪模仿向自主原创、引领发展转型的跨越发展为目标，为经济社会发展、应对空间灾害和空间安全提供先进的科学基础和不断开拓前沿新领域的能力。

### ■ 发展空间天气集成建模与预报能力

集成建模与预报能力系指根据地基、地基观测资料和科学认识，运用数理统计、数值模拟和数据同化等方法建立描述日地空间各组成区域的基本状态、结构和变化的模型，在此基础上进行日地系统空间天气整体变化的集成建模与预报，以及将研究模型转换为业务预报和应用需求模型的能力。它是实现空间天气效应分析与工程服务应用能力的基础、科学与应用之间的桥梁与纽带。

### ■ 拓展空间天气效应分析和工程服务的应用能力

现代社会的发展和正常运行要求空间天气科学不仅告诉空间发生

了怎样的变化、能够预报空间天气未来如何变化，而且要求能够对空间天气事件所伴随的空间天气要素如电磁辐射、高能带电粒子、等离子体和中性大气等的急剧变化对技术系统的影响进行预测、防护和评估。我国这些方面与国际水平相距甚远，只有一定跟踪研发能力，急待拓展其应用能力，需加大支持力度开展空间天气的影响机理、效应模型、防护策略等相关研究。

### 战略实施

空间天气按其性质与功能可划分为：基础空间天气、军用空间天气和民用空间天气三个领域，各自都有战略实施计划的建议。这里仅就基础空间天气领域——建议国家组织实施《国家空间天气十年计划》（以下简称《计划》）谈一点思考。

《计划》的基本思想：

夯实空间天气科学的天基、地基的探测基础，以我国在空间天气重大科学问题上取得自主创新的重大突破为牵引，将空间天气科学的四项基本能力——监测能力、创新能力、建模与预报能力和效应与工程应用能力集成升华为代表国家整体利益的国家空间天气科学自主创新体系；与已在推动组织或纳入计划的军用、民用计划形成有机配合，避免重复建设，实现统筹兼顾、倍增效益、科学发展；服务国家战略需求，为建设空间强国、拓展知识创新能力和提升应对严重空间天气灾害能力提供科学基础和支撑。

《计划》的主要领域：

①空间天气的天、地一体化的监测体系；②空间天气科学前沿和整体变化过程；③空间天气的集成建模与预报；④空间天气对人类活动的危害效应；⑤地球天气/气候与空间天气/气候间关系的探索；⑥空间天气保障与服务。

《计划》的主要任务：

①构建空间天气天地一体化监测体系；②组织实施空间天气科学前沿的国家“旭日”重大研究计划；

## 太阳活动的缓变与瞬变特征

■ 王华宁 闫岩

### 引言

太阳是唯一一颗能让我们仔细观察到其表面细节的恒星，它还是一颗球对称和稳定的恒星。因此，从认识恒星的角度来看，对于太阳的研究对整个天体物理学来讲是必要的，而且是重要的。但是大量观测表明，太阳除了稳定和均匀地向四面八方发出辐射的同时，它的大气中的一些局部区域，有时也会发生一些发生时间相对短暂的“事件”。例如，在太阳光球中，往往可以观测到许多比周围明显黑暗的点状小片区域（太阳黑子）和比背景较为明亮的浮云状小片区域（光斑）；在色球中，也可经常观测到比周围明亮的大片区域（谱斑）和突出于色球平均高度之上奇形怪状的太阳物质（称为日珥，或者暗条）；日冕中也可观测到许多不均匀结构。特别是在色球和日冕的大气层中，偶尔还会发生表明有巨大能量释放或者巨大质量抛射的太阳爆发现象。上述这些现象不仅存在时间比较短暂而且不断变化，并且往往集中在太阳黑子附近的太阳大气的局部区域。

太阳大气中的短暂事件属于太阳

活动的瞬变现象，太阳黑子数量的多寡变化、太阳电磁辐射的长期变化等属于太阳活动缓变现象。

太阳活动缓变主要影响地球环境的长期变化，因而与地球的气候和地质演化有关联；太阳活动瞬变主要影响地球环境的短期变化，形成空间天气事件，对人类的诸多高技术系统产生危害。

### 太阳活动的特征

太阳活动，实际上指的是在太阳大气中的活动现象。包括太阳黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥，以及日冕物质抛射、射电暴、太阳质子事件等瞬变事件。对于瞬变事件，我们现在主要关注的还是太阳耀斑、日冕物质抛射两种最重要的太阳活动，因为他们二者对于我们的影响非常大。除了时间尺度较小的瞬变事件外，太阳黑子还存在着长期变化的缓变特征。

### 太阳活动的缓变特征

太阳活动缓变特征可以从多种太阳观测现象中体现出来，如太阳黑子数、太阳常数、太阳10厘米射电流量长期变化等。由于太阳黑子数观测历史记录最长，因而黑子数量变化是常用于表征太阳缓变特征的物理量。

当太阳在地平线附近的时候，我

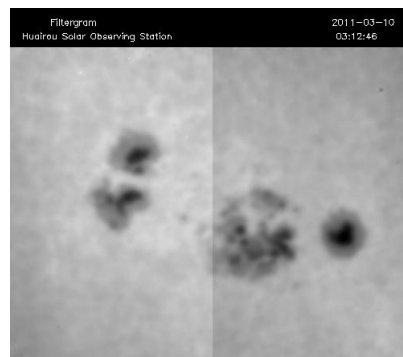


图1 太阳白光像，黑点区域为太阳黑子，拍摄于北京时间2011年3月10日11时12分

们甚至可以用肉眼分辨出太阳黑子来。黑子源于日面出现的小黑点，但是并不是任意的小黑点都能发展成黑子。当小黑点的尺度增长到5"以上时，它本身就形成了黑子的核心部分，称为“黑子本影”。在本影的周围开始出现灰暗的区域，此区域亮度超过本影，但是还是暗于光球背景，称为“黑子半影”。半影出现后，小黑点有强烈的向黑子发展的趋势。于是，半影的存在与否可以看做是是否为黑子的标志。黑子本影处的磁场强度与黑子的面积有关，面积越大磁场越强。大黑子本影中心的磁场强度可达4000G，到半影与光球交界处降至1000~1500G。据统计，只有约20%的黑子磁场强度大于2000G，

③进一步建设和完善我国空间天气的监测预警业务体系；④建设国家空间天气科学中心、空间天气联合预报会商中心和空间天气效应联合分析与防护中心；⑤实施我国领头的国际空间天气子午圈计划，推进全球空间天气联合数值预报中心建立；⑥共建一批航天和通信保障基地，推进我国空、天一体化保障体系建设；⑦培养一支活跃在国际科学舞台和保障空间安全的领军人才队伍；⑧健全空间天气管理、计划与协调体系，完善军民融合的运行

机制。

### 后记

从我国的国情出发，空间天气体制建设十分重要，可先在基础空间天气领域成立国家空间天气科学计划与协调领导小组，统筹考虑我国基础空间天气领域的发展，有利于尽快组织实施国家空间天气十年计划专项，关系实现我国空间天气科学从跟踪模仿向自主原创、引领发展转型的跨越式发展。此外，应充分发挥国家空间天气监测与预警中心的国家职能，进一步建设和完善国家空间天气监测预警

业务体系，有效应对空间天气灾害；再有，建立我国空间天气保障的军民融合共建体制十分重要，这是实现科学发展，事半功倍。最后，加大空间天气知识的科普宣传力度，使中国成为有空间天气知识的国家，这也是建设一个科学大国应有的知识水平。

（作者单位：中国科学院空间科学与应用研究中心）

约有5%的黑子磁场强度超过3000G。在黑子的一生之中，磁场强度在起始期增加很快，接着是较长保持磁场强度基本不变的时期，最后是磁场逐渐衰退的消亡期。图1是中国科学院国家天文台怀柔观测基地的太阳白光像，上面的黑点区域即是太阳黑子。

自从1611年望远镜发明以来，伽利略等许多科学家开始用望远镜观测太阳。1843年，德国天文爱好者Schwabe根据1826—1843年积累的资料，第一次指出太阳黑子数存在大约10年的周期。19世纪中叶，瑞士天文学家Johann Rudolph Wolf最早提出用以表征太阳黑子或黑子群在日面出现多少的一种指数，计算公式如下：

$$R=k(10g+n)$$

其中， $R$ 是黑子相对数， $g$ 代表黑子群数， $n$ 代表黑子的个数， $k$ 是与观测台站，仪器和观测者有关的一个参数。

德国天文学家Spörer先后指出在17世纪的几十年存在一个明显的太阳黑子数突降期，甚至有些年份根本无黑子观测记录。这个时期持续时间大约为70年，于1716年结束。几乎同时，英国天文学家，格林尼治天文台太阳部主任Maunder在1890年确认了Spörer的发现，并在1894年撰文首次提出所谓“延长极小期”

(A Prolonged Sunspot Minimum, 1645—1715年太阳活动的微弱时期)的概念。他提到，研究“延长极小期”不但可以加深我们对于太阳本身的理解，更有助于让我们了解日地关系。Eddy又根据树木年轮的同位素测定，间接地给出了延长极小期的证据，并为了纪念Maunder的贡献，把1645—1715年太阳的平静期称为“蒙德极小期”(Maunder Minimum)。

此外，Spörer还发现了太阳黑子在日面上的活动随时间变化的纬度分布也有规律性，即几乎所有太阳黑子位于 $\pm 30^\circ$ 的纬度内，而且每一个太阳周伊始，一般分布在 $\pm 30^\circ$

附近，而后逐渐向低纬度移动的规律，史称“蝴蝶图”。太阳黑子的变化规律在每个太阳活动周并不是相同的。所以，太阳活动的长期预报则主要在于预报每个太阳活动周的太阳黑子数上面。

### 太阳活动的瞬变特征

太阳黑子的周期规律是太阳活动的缓变现象，而太阳活动还有多种瞬变的活动现象更加重要。

#### ■ 太阳耀斑

当太阳大气中的磁能积累到一定程度时，会突然释放，使太阳的某些波段的辐射突然地、快速地和强烈地变化，这种现象，我们称之为“耀斑”。强烈的辐射甚至可以覆盖整个电磁谱，从波长短于1埃的 $\gamma$ 射线和X射线，直到波长达几千米的射电波段，几乎全波段的电磁辐射增强。

一个典型的耀斑可以分为以下几个过程：在耀斑没有爆发前，一段时期内，软X射线辐射持续增强，这个时期被称为“预耀斑相”；而稍后就进入耀斑的“爆发相”或者说“脉冲相”，在这段时间里，硬X射线和 $\gamma$ 射线脉冲性增强，常有短而强的尖峰出现，而此时软X射线通量较前期上升更快；之后，进入到“渐变相”或称之为“主相”，硬X射线和 $\gamma$ 射线以指数规律衰减，而软X射线继续上升，达到尖峰后再以指数规律衰减，但是时间相对较长。整个耀斑短可以仅几秒，长则可能到若干小时。图2(中国科学院国家天文台怀柔观测基地的H-alpha图)清晰地展现出一次正在爆发的耀斑过程。

经过近几年来对于耀斑的地空综合观测，人们对于耀斑的认知发生了重大转变。现在，太阳物理界普遍认为，耀斑是一个多级次辐射各种电磁波和粒子的复杂爆发过程，光学波段的现象不过是耀斑的一种次级现象。

太阳耀斑现象涉及到许多复杂的物理过程，包括 $10^{32}$ erg量级的能量积累，等离子体不稳定性触发，

高能粒子的加速和传播方式，它们激发产生的从 $\gamma$ 射线、X射线、紫外和可见光直至射电波段辐射增强的机制，同时发生的耀斑区大气动力学变化，以及物质运动和抛射现象等，因此对它的研究具有重要的理论意义。另一方面，耀斑事件引起的X射线辐射增强将破坏地球电离层的正常状态，耀斑的高能粒子流将造成地球轨道附近高能粒子污染并干扰地球磁层，这些扰动也会向下传播，导致地球低层大气(平流层和对流层)热力学状态的变化。通过这些扰动，太阳耀斑对人类的航天活动，无线通信，以及天气和气候产生影响。电磁辐射从太阳到地球只需要大约8分钟的传播时间，所以，对于各种波段爆发的预警就需要有好的耀斑预报方法。目前虽然没有完全可信的太阳耀斑发生的预报方法，但是中国科学院国家天文台太阳活动预报中心，还是通过多年来积累的观测资料，总结出若干种较为有效的耀斑预报方法。经验的预报方法可能不能完全揭示所有的物理过程，所以，如果想提高预报的准确率，还是要努力寻找磁能在日冕中积累的方式，以及释放机制。所以从空间天气学角度来看，磁能在日冕中积累的动力学、磁场位型等等就成了太阳耀斑研究的重中之重。

#### ■ 日冕物质抛射

除了耀斑之外，近些年来，人们对于太阳活动的认识，更多则放在日冕物质抛射上面。

日冕是太阳大气的最外层，由色球表面延伸至数百万千米的星际空间，其实质是由于高温而完全电离的稀薄等离子体，包括质子、高度电离的离子和高速的自由电子等。最初，日冕是在日全食中被发现的，由于其类似于太阳的王冠，所以称为日冕(corona来源于拉丁语词汇“王冠”)。日冕在平时不可见，而在日

全食的时候,可以看到环绕暗黑太阳的银白色冕区。广义的日冕包括几个太阳半径以外的太阳风区,延伸到包括地球在内的广大太阳系空间。

日冕物质抛射是日冕物质在较短的时间内被大规模的抛出太阳本身,抛入行星际空间的一种太阳活动事件。它是太阳大气中最剧烈的爆发活动之一。短时间的日冕活动按照其活动区域大致分为两种:一种是某些局部区域的日冕物质瞬时飞离太阳后又返回日冕;另一种则是日冕物质抛射,其速度大大超过了日面的逃逸速度,一经抛出即不会返回太阳。

大量的日冕物质抛射观测开始于1970年前后,自1996年运行以来,已有一万多次日冕物质抛射事件被观测、记录到。由于日冕物质极其稀薄,亮度很低,所以观测日冕物质抛射很难在地面进行,通常是利用卫星搭载的日冕仪在空间中进行。图3即是一次日冕物质抛射过程。日冕物质抛射可以在白光、X射线和射电波段里观测到。大量的观测与分析不仅给出了日冕物质抛射的许多性质,也很大程度上改变了我们过去关于耀斑与日冕物质抛射过程的因果关系,日冕物质抛射伴随的耀斑更像是前者的次级过程。

日冕物质抛射本质上是抛离太阳本身的大块等离子体云,从它的密度和体积估计,一次抛射的物质大概有 $10^{14} \sim 10^{16} \text{g}$ ,平均为 $10^{15} \text{g}$ 。由于日冕物质抛射的发射角度和我们的目视方向存在一定的角度,所以我们观测到的日冕物质抛射的速度实际上是其投影速度。日冕物质抛射的投影速度分布较为广泛,从 $20 \text{km/s}$ 到大于 $2000 \text{km/s}$ ,甚至有可能达到 $3500 \text{km/s}$ 。一般来说,投影速度的平均速度大约从太阳活动低年的 $300 \text{km/s}$ 可以上升到太阳活动峰年的 $500 \text{km/s}$ ,并且其展开角度达 $2 \sim 360^\circ$ 。从每次物质抛射的整体速度和质量来估计,一次日冕物质抛射所携带出去的动能大约为 $10^{22} \sim 10^{26} \text{J}$ ,平均为 $10^{24} \text{J}$ 。

日冕物质抛射的形态结构也非常

复杂和多样化,较经典的形态为膨胀的泡沫状圆环,前端是亮环,中间是暗腔,末端是亮核,亮环的双臂插在太阳上,但是其他形态,如云状、扇形、多峰结构、喷射状,以及另外一些形态也存在。

以往往往把观测得到的太阳活动对各种日地空间和地球造成的物理现象,如行星际激波、高能粒子流、地磁暴、极光和电离层等,全部归因于太阳耀斑事件。但是经过最近日冕物质抛射的研究表明,其本身对于日地空间和地球造成的物理效应并不亚于耀斑。而且太阳耀斑和日冕物质抛射产生的影响有着较为不同的特征。一般来说,耀斑对粒子的加速过程是脉冲式的,粒子流量不大。大流量的粒子事件则是由日冕和太阳风粒子通过激波加速形成的,而激波正是由快速日冕物质抛射驱动的。日冕物质抛射驱动的行星际扰动也是非重现性强地磁暴的主要扰动源。关于日冕物质抛射预报的方法,现在还处于开始阶段,主要是基于先兆的统计研究。研究内容包括区磁场拓扑结构特征和演化特征、多波段成像观测特征和动态演化特征。所有的统计结果都表明日冕物质抛射源区的自由能存储具有明显的标志,如非势磁场形态(强梯度、强剪切);有利于磁重联发生的拓扑结构和运动(磁零点、磁流管扭曲、新磁通量浮现、磁通量对消)等。依据这些特征可以提前数十小时给出优于60%的预测,但预测日冕物质抛射发生的准确时刻较为困

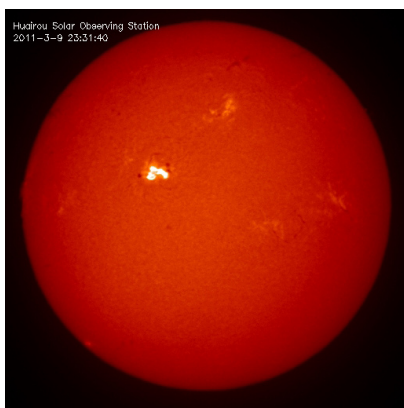


图2 H-alpha图,明亮区域为耀斑发生区域,该耀斑为X1.5级,发生在北京时间2011年3月10日7时31分

难,其主要原因是这些特征不能描述日冕物质抛射发生的具体物理过程。在深空对太阳和行星际空间进行多波段、多方位监测是预测日冕物质抛射的发生时刻和对地影响的重要前提。

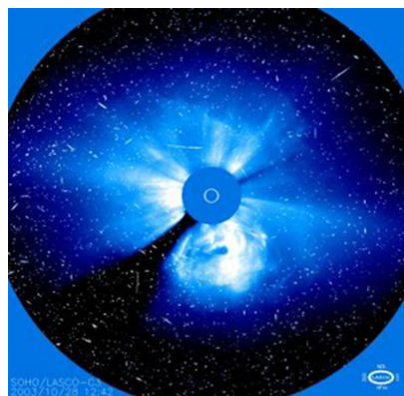


图3 SOHO/LASCO日冕仪观测的日冕物质抛射的形态

## 结语

在太阳活动现象方面,一次耀斑过程只持续几秒钟至几个小时,一次日冕物质抛射过程也基本上在几个小时左右,一个活动区的寿命约几天至几个月。同时,整个太阳大气所发生的太阳活动现象的多寡,还表现出平均长度约为11年的周期,也可能存在更长的周期。因此,太阳活动的时标可以认为从几分钟至几十年。所以,大功率的太阳周期性活动变化叠加短时间的太阳活动事件,就是现阶段太阳活动的主要特征。

(作者单位:中国科学院国家天文台,中国科学院太阳活动重点实验室)

# 空间天气发展时间简表

贾朋群 编译

**1088年**  
中国北宋科学家沈括在其著作《梦溪笔谈》中，第一次清晰描述了地球磁现象，发明了指南针和地磁偏角，较欧洲早了近100年。

**1577年**  
丹麦天文学家第谷首先观测到彗星，并用视差方法说明彗星在地球大气层之外，与亚里士多德天空不变性的观点相矛盾。

**1609年**  
伽利略将望远镜引入天文学观测，使得人类对宇宙细节的认识有了质的飞跃。

**1610年**  
伽利略等多人几乎同时观测到太阳黑子，并进行系统记录。

**1902-1903年**  
挪威科学家Kristian Birkeland在他的实验室里模拟极光。

**1902年**  
人类发现位于高层大气的电离层，其反射作用解释了为什么无线电波能够在沿地球弯曲表面传播。

**1896年**  
《地磁》杂志 (Terrestrial Magnetism) 创刊, 1899年更名为《地磁和大气电学》，1949年更名为《地球物理研究杂志》(JGR)。

**1887年**  
德国著名物理学家赫兹，根据麦克斯维尔数学上的预测，第一次在实验室里成功发送和接收无线电波。

**1904年**  
国际太阳联合会成立。该组织终止于第一次世界大战。在某种意义上，15年后成立的IAU（国际天文联盟）可看作是国际太阳联合会的再生。

**1921年**  
5月15-16日，地磁风暴导致纽约铁路整个信号系统和交换系统瘫痪，全球电信中断。

**1925年**  
哈勃依据观测，提出星系概念，即是像银河一样的星群。这一发现根本上改变了人们的宇宙观。

**1959年**  
苏联卫星“月球1号”首次直接观测到太阳风并给出其强度。

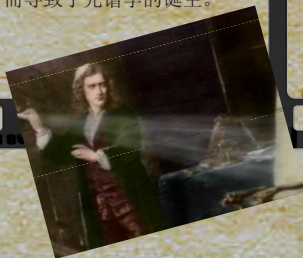
被很多人关注的空间天气的概念，是从经典气象学中的宇宙气象学 (cosmical meteorology) 演化而来，是气象科学中较为年轻，但重要性和研究及应用成果不断增加的领域。其出现的端倪，可以追溯到远古希腊哲人们关于人类已知世界之外世界的猜测。而其近现代的发展，又融入了太多经典科学家的贡献。其发展脉络，完美诠释了自然科学体系一脉相承的特征。

这个时间简表，因版面所限，采用“厚古薄今”方式，主要给出20世纪之前最重要的人类发现和天文、物理等基础学科相关的发现和科学突破进程。正是这些科学家和科学事件，使得吸纳性很强、较为年轻的空间天气领域，在现代高科技“造就”了面对空间天气事件人类社会脆弱性增强的背景下，通过与巨大的需求融合而逐步走向成熟。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

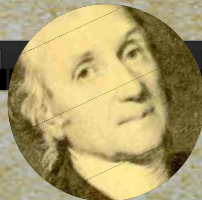
**1669年**

牛顿发现光的组成，从而导致了光谱学的诞生。



**1790年**

Cavendish用三角测量法，精确测量了极光的高度在80~112km之间。



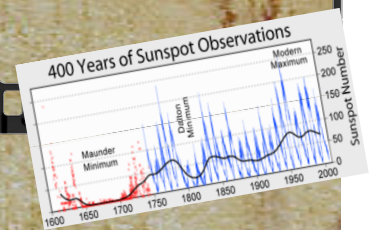
**1831年**

法拉第发现电磁感应现象，揭示出磁与电之间转化关系，这个关系后来含在麦克斯韦方程中，被称为法拉第定律。



**1843年**

德国科学家施瓦布发现了太阳活动约10年的变化周期。



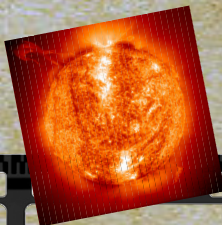
**1882年**

第一次国际极地年，国际上联合开展了认识气象、地磁和极地极光现象的科考活动和研究。



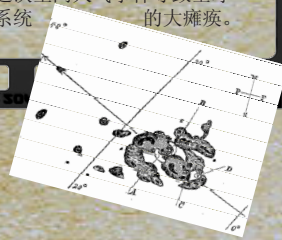
**1870年**

第一次拍摄日珥照片，并且注意到太阳光谱中“耀斑”能立刻使得地磁出现小偏差。



**1859年**

观测到太阳白光耀斑，并在1天后出现200年来最强地磁风暴，揭示了两者之间因果关系。这次空间天气事件导致全球电信系统的大瘫痪。



**1846年**

奥地利科学家多普勒，发现了声和光依赖于观测者和目标相对运动频率发生改变的理论，也被称为多普勒移动。



**1989年**

3月13日，加拿大魁北克电力网因空间天气事件瘫痪长达9小时，600万居民用电受到影响。



**2002年**

6月1日中国气象局成立国家空间天气监测预警中心，正式开展国家级空间天气业务。



**2007年**

国际太阳物理年 (IHY)，持续到2009年。



**2010年**

6月美国公布国家空间天气战略计划。



## 文摘 (中文文献)

### 亚洲季风区积云降水和层云降水比例的时空分布——《大气科学》2011年第35卷第6期

杜振彩等初步分析了亚洲季风区积云降水和层云降水比例的时空分布的成因。从多年平均的角度看, 25°N以北的东亚季风区, 由于环境风垂直切变表现为高低层风向一致的较为深厚的西风切变, 而且这种风切变也表现出随纬度增加而加大的空间分布特征, 并且, 对流层底层质量加权平均的温度、比湿、相当位温、对流有效位能、对流抑制能和抬升指数的空间分布也表现出存在较明显的经向梯度特征, 因此, 若以积云降水和层云降水比例50%为分界线阈值, 当环境风垂直切变大于10m/s、对流层底层质量加权平均温度小于306K、比湿小于14g/kg、相当位温小于350K、对流有效位能小于400J/kg、对流抑制能大于400J/kg以及抬升指数大于2K时, 积云降水容易被抑制, 而层云降水将占主要地位。而在南亚季风区和25°N以南的东亚季风区, 各种动力学因子和热力学因子有较均匀的空间分布特征, 从而引起该地区积云降水和层云降水比例较均匀的分布特征。

### ISI模式在夏季模拟结果较好——《极地研究》2011年第23卷第3期

何昉等比较了EISCAT Svalbard雷达(ESR)和南极中山站DPS-4测高仪2006—2007年观测数据, 对太阳活动低年不同季节的极区电离层F2层临界频率( $f_oF2$ )和峰值高度( $h_mF2$ )进行统计分析, 并与IRI-2007模式比较, 结果表明, IRI模式季节日变化特征更多考虑太阳光辐射电离的影响, 在夏季由于太阳光辐射电离占主导作用, 所以无论中山站还是地磁共轭的ESR的IRI模式预测与观测符合情况较其他季节要好。冬季中山站与ESR的观测与IRI模式的偏离较大, 因为在冬季太阳全天都处于地平线以下, 太阳光致电离引起的电子产生率作用很弱, 而IRI模式无法反映出极光粒子沉

降引起的F2层临频的变化趋势。综合来看, 对于F2层临频, IRI-2007模式在南北极各自的夏季以及两分季节的日侧预测效果较好, 在冬季及两分季节的夜侧的预测情况较差; 对于F2层峰高而言, IRI-2007模式在南极中山站的预测效果要优于北极ESR地区的预测。

### 近岸海洋气象平台数据处理对通量的影响——《地球科学进展》2011年第26卷第9期

赵忠阔等以博贺海洋气象平台2层涡动相关仪近7个月的观测数据为例, 详细阐述了目前在数据采集平台上无法实现实时处理的几种方法, 定量分析了这些处理过程对通量结果的影响。最后依据湍流发展性与平稳性指标, 对数据进行了质量控制与质量评价。分析结果表明: (1) 去野点前后, 4种通量相对差异小于1%的样本, 均不低于总样本数的80%; 在通量值较小时, 去野点可造成通量值很大改变。(2) 对于海上大气边界层的通量观测, 平面拟合方法对通量的处理结果要明显优于二次旋转。(3) 频率损失订正可为通量带来5%~8%的增量, 晚上的订正幅度稍大于白天。频率累积检测显示, 对于大气稳定度发生转变的时段, 通常的半小时取平均时长不足以包含低频部分对通量的贡献, 必须对通量结果进行检测。(4) 总体湍流特征检验与平稳性检验显示, 大约50%的数据可以用于基础研究。2层通量结果的比较也显示, 该站点的通量观测数据质量可以得到保证。

### 台风“梅花”预报误差分析——《气象》2011年第37卷第10期

许映龙等指出, “梅花”业务预报的主要难点是预报登陆还是近海北上, 乐观地估计日本附近副热带高压的西进是“梅花”路径预报出现偏差的主要原因。西风槽对副热带高压西进的持续阻挡和“梅花”东侧1110号台风“苗柏”的东北行共同导致副热带高压南落, 则是“梅花”引导气流由东南气流转为偏南气流的主要因素, 并造成“梅花”持续北上、三次与我国大陆擦肩而过。因此从这个意义上说, “苗柏”的东北行在一定程度上对副热带高压南落具有指示意

义。“梅花”强度预报偏强的主要原因是仅考虑了台风移入高海温区可能对其强度加强带来的有利影响, 而忽视了环境风垂直切变、干空气的侵入、台风本身的结构等多种因素对台风强度变化的影响; 而从决策服务的角度考虑, 由于强度预报的不确定性强, 因此在台风强度业务预报中, 应忌讳将强度报得太强, 以避免给服务带来较大的被动。“梅花”降雨预报偏强的主要原因是对“梅花”干台风特征的估计不足以及“梅花”在北上过程中未能与冷空气结合有关, 而我中国东部地区长时间维持宽阔的槽区导致我国北方地区多为暖平流控制则是“梅花”未能与冷空气结合的主要因素。

### STMW与东亚大气环流关系的一些新认识——《气象学报》2011年第69卷第4期

常蕊等探讨了STMW(北太平洋副热带西部模态水)的季节、年际变化与东亚大气环流—北太平洋海表风应力、海表热通量等异常的关系。分析指出: 气候平均态的STMW是一个属性均匀、南北跨越24~32°N纬度带上的准定常的闭合低位涡水团, 其中心大致位于25.4 $\sigma_\theta$ 密度面上, 4月STMW体积最大、强度最强, 夏秋逐渐减弱, 12月体积最小、强度最弱; STMW的季节变化与海表风应力、海表热通量及混合层深度的季节调整过程紧密联系。STMW的年际变化除了受海洋自身动力过程(如黑潮大弯曲、中尺度涡和垂直对流混合等)异常影响外, 还与东亚冬季环流强弱变化引起STMW形成区的风应力动力混合和海表蒸发等物理因子异常变化有关。年际尺度上, 前冬东亚大气环流强弱变化与5—7月STMW强弱变化的联系可能是通过东亚环流的强弱变化影响STMW形成区的动力混合及海表热通量过程实现: 冬季东亚季风环流偏强(弱), STMW形成区洋面风应力的动力混合作用及海表热力蒸发加强(减弱), 使得海洋对流混合加强(减弱), 进而加强(抑制)了混合均匀的低位涡水体进入温跃层, 随着季节发展, 造成5—7月STMW的强度偏强(减弱)。

## 文摘 (英文文献)

**北半球冬季气候变化的太阳强迫**——Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 2011, Vol. 4, No. 11.

太阳辐射变化对地表气候具有重要影响。观测表明,如果冬季太阳活动较弱,西风也有所减弱,例如在11年太阳黑子循环的最小相位。然而,气候模式始终难以重现这些信号。太阳紫外光谱辐照度监测仪(SUSIM)的监测显示,太阳紫外辐射的变化可能比预期的要大。Hadley中心的Ineson等使用这些观测的紫外辐射变化,对一个海洋—大气耦合模式进行了强迫。研究发现,当响应于太阳活动的低值时,模拟的地表温度和气压的格局,类似于北大西洋涛动或北极涛动负位相时的情形,其幅度与观测也是一致的。如果对近年来太阳紫外辐射的观测是正确的,那么弱的太阳活动,将使北欧和美国的冬季更为寒冷,南欧和加拿大的冬季变得温和,而对全球平均温度基本没有影响。

**冬季降水模拟对物理参数的敏感性**——High-Resolution Simulations of Wintertime Precipitation in the Colorado Headwaters Region: Sensitivity to Physics Parameterizations. *Monthly Weather Review*, 2011, Vol. 139, No. 11.

NCAR的Liu等使用一个4km水平分辨率的区域气候模式分析了不同物理参数化方案对冬季降水的影响,以评价可适用于下一代高分辨率区域气候模式下的寒冷季节山区降雪对云微物理、行星边界层(PBL)、地表和辐射传输等物理参数的敏感性。结果表明,地形降水对云微物理参数化方案高度敏感。使用的7种云微物理参数化方案中有两组效果良好,其他5种对降雪的预测偏高于观测的30%~60%;不同方案的差异主要在于区域平均,水汽凝结的空间分布,潜热廓线和云区特征。相比而言,模拟显示降雪对地表、边界层和辐射传输具有较低的敏感性。

**利用红外温度计测量水汽总量**——Measuring Total Column Water Vapor by Pointing an Infrared Thermometer at the Sky. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, Vol. 92, No. 10.

大气中的水汽总量对于天气预报的重要性不言而喻。来自Geronimo Creek天文台和NASA的研究者们通过一个为期两年的试验,发现利用廉价的红外温度计可以相对准确地反演出无云天空条件下的大气水汽总量(PW),并且不受白天、夜晚的限制。自2008年9月8日至2010年10月18日,该试验在Texas的中南部的野外进行,使用便携红外温度计直接测量了无云天顶的温度( $T_z$ ),测量时间主要在中午,偶尔在夜晚。PW的测量使用了MICROTOPS II太阳光度计。计算发现,PW和 $T_z$ 的相关系数高达0.9,RMS约为3.2mm。 $T_z$ 与31km外GPS样点的PW的相关系数达0.79,RMS约为5.8mm。试验也比较了8种红外温度计测量的 $T_z$ 与PW的相关系数,发现有两种红外温度计测量的 $T_z$ 与PW的相关系数高达0.96,RMS仅为2.7mm。本研究提供了一个简化的水汽总量测量方法。

**土地利用变化加速了南美洲热带地区南部干旱事件的发生**——Land use change exacerbates tropical South American drought by sea surface temperature variability. *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, L19706.

在过去30年中,南美洲热带地区的降水呈现出北部增加、南部下降的趋势。鉴于同期该地区经历了显著的土地利用变化,有必要评价土地利用变化对降水的影响程度。加州理工学院的Lee等通过NCAR CAM3模拟分析,表明土地利用对于该区域的降水变化具有不可忽略的影响。当单独使用历史海温(SST)强迫NCAR CAM时,模拟得到的降水尽管具有近似的南北偶极子特征,但是与同时使用人为土地利用变化强迫相比,单独海温强迫显著低估了南部地区的降水下降趋势。模拟发现,土地利用变化对降水的影响主要发生在当地的旱季和年平均降水相对较少的区域,比如当使用土地利用变化进行强迫时,那些非常低(<10 mm/月)的月平均累积降

水的发生频次显著增加。土地利用变化也会改变地表湍流量,对气温产生影响。研究认为,南美洲热带地区南部持续不断的森林砍伐可能会导致更频繁、更强烈干旱事件的发生。

**2011年北极臭氧空前减少**——Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature*, 2011, Vol. 478, No. 7370.

南北两极臭氧的化学损耗常发生于每年的冬春季节。在南极,平流层低层臭氧的减少经常导致每年臭氧洞的出现。然而,不同于南极,北极的臭氧损耗尽管变化很大,但减少幅度基本维持在一定的范围内。来自加州理工学院的Manney等发现,2011年年初北极臭氧出现了空前的损耗,减少规模在观测记录上第一次接近了南极臭氧洞的水平。研究认为,北极地区平流层低层长时间的低温条件使得氯对臭氧的破坏持续增强,导致北极地区18~20km上空的臭氧减少了80%。研究同时指出,北极臭氧洞也可能出现在比南极更温和的温度条件下,目前还无法判断北极的臭氧损耗在未来是否将会持续或者加重。

**1980年以来的气候变化与全球农作物产量**——Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, 2011, Vol. 333, No. 6042.

20世纪50年代以来,全球气温平均每10年升高了约0.13℃,气候变化对农业的影响依然没有被充分理解。斯坦福大学的Lobell等使用回归方法构建了非线性的产量响应统计模型(这种统计模型显示的产量对气温和降水的敏感性与基于过程的作物模型是一致的),评价了1980—2008年期间气候变化对全球主要农作物产量的影响。研究认为,气候变化导致全球玉米、小麦的产量分别下降了3.8%、5.5%,而大豆和水稻的总产量基本没有变化。在一些国家,气候变化引起的产量下降很大程度上抵消了由于技术进步、CO<sub>2</sub>施肥效应以及其他因素引起的产量增长。

## 《空间风暴物理学：从太阳表面到地球》评介

■ 李伟光 侯美亭

空间天气属于日地物理学的范畴，它描述了可能干扰或危害空间和地面技术系统以及人类健康的太阳、太阳风、地球磁层和电离层等不同要素的时空变化情形。空间风暴是空间天气最强烈、最具破坏性的表现形式。

从20世纪90年代开始，空间天气受到了越来越多的关注。空间天气研究得到重视的一个关键原因是，人们逐渐认识到，太空中的大量技术系统以及人类自身很容易受到恶劣空间天气条件的干扰。事实上，面对辐射环境，日趋小型化、复杂化的现代技术系统比以前变得更加敏感。同时，现代社会越来越依赖空间基础设施。因此，充分理解空间天气的物理基础，是十分必要的。

虽然在过去几年里出版了大量关于空间风暴的研究和评论文章，但始终没有全面系统介绍从太阳表面到地球的一系列物理过程的专著。为弥补这一空白，Springer出版社于2011年出版了芬兰赫尔辛基大学Hannu E. J. Koskinen教授编著的《空间风暴物理学：从太阳表面到地球》(Physics of Space Storms: From the Solar Surface to the Earth)一书。本书的读者对象是熟悉基础等离子体物理，并具备了经典物理学知识的空间物理、空间天气的研究者。本书涵盖了太阳大气中的风暴、太阳风、磁层和电离层风暴等不同主题。在保证本书内容的合理性的同时，作者尽可能使用了那些已经给出大量分析和定量描述的材料。由于对空间天气预测具有重要价值，空间等离子体物理的研究也在不断推动。本书也特别关注了许多关于空间等离子体物理的重要问题。

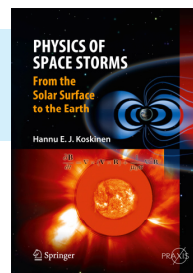
本书共分为三个部分。第一部分即第1章“日地之间的风暴旅

行”，内容较多，概述了日地之间空间天气的发生环境和各种空间天气现象。熟悉太阳、太阳风、磁层和电离层等基本物理知识的读者可以跳过本章。

本书第二部分用7个章节的篇幅介绍了空间等离子体物理的知识。虽然这部分是以解释的方式编写的，但需要读者已经掌握一定的基本等离子体物理学知识。第2章简要介绍了等离子体物理学的基本概念和一些电动力学、统计物理学工具。第3章回顾了绝热不变量，介绍了单粒子在偶极场、电流片以及时变电场中的运动。第4章从介绍冷等离子体波的概念开始，以无线电波在电离层中传播为例，讨论了WKB近似下的波在非均匀介质中的传播。

第5章论述了Vlasov理论，从Landau解法延伸到均匀磁化等离子体中波的模式。第6章阐述了磁流体力学(magnetohydrodynamics, MHD)的有关内容，与其他等离子体物理著作相比，本章更多的重点放在了场向电流上，因为它们在太阳大气、太阳风、磁层和电离层耦合中是非常重要的。第7章介绍了空间等离子体不稳定性的有关知识，如自由能量源和稳定性判据以及几个重要空间风暴的不稳定性研究。第8章专门讨论了其他不稳定态的磁重联和撕裂模，磁重联的微物理机制和基本特征是空间物理学的重要组成部分。

本书的一个主要目的是建立基本等离子体物理学和现代空间风暴研究之间的桥梁，这也是本书第三部分的主要内容。本书第二部分与第三部分的转变没有明确的界定。在某种意义上，第8章中已经开始涉及第三部分的内容。从第三部分开始，本书关注了空间天气研究中的关键问题。第9章讨论了等离子体的辐



Springer, 2011年出版

射和散射，包括了等离子运动导致的辐射以及在等离子体内发生的主要散射过程。第10章，探讨了利用第3章中介绍的绝热不变量研究空间等离子体输运和扩散的有关问题。激波是空间等离子体中的重要现象，也是空间风暴中尺度最大、变化最显著的结构之一，第11章讨论了日地空间中激波的形成和加速等问题。

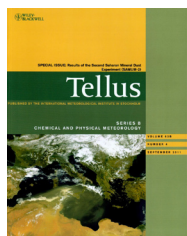
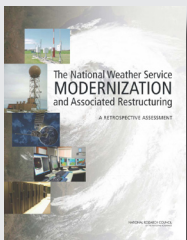
本书最后探讨了太阳—地球系统中的空间风暴现象。第12章介绍了太阳表面及太阳风中各种爆发现象。第13章描述了磁层暴、亚暴及其产生因素。由于内磁层的风暴现象非常有趣且过程复杂，将其单独列在了第14章。空间风暴对大气的影 响，以及空间风暴对地面上感应电流的影响在本书的结尾部分即第15章进行了简要讨论。

日地之间存在着种类繁多的现象，有大量不同的理论、模型来解释这些现象。选择以太阳为中心还是以地球为中心开展论述是比较困难的。太阳大气层，尤其是日冕层，比地球大气层的变化更加猛烈。太阳几乎是日地系统中所有空间风暴的驱动因子。这些事实表明应当以太阳为中心来看空间风暴。另一方面，人类生活在地球上，处理空间风暴带来的影响显得更为重要。本书的选择是以地球为中心，但比传统磁层物理学著作更强调了整个空间风暴的因果序列。

(作者单位：李伟光，海南省气候中心；侯美亭，中国气象局气象干部培训学院)

《NWS现代化和相关调整：回顾性评估》（预印版）2011年

1989年到2000年，美国投入45亿美元进行了国家天气局（NWS）现代化建设和相应的调整。这一举措给美国天气服务业带来了巨大成功。美国科学院受委托对已经结束10余年的NWS现代化建设再次进行了为时2年的回顾性评估，形成了这份以经验与教训总结为主的报告。预计评估小组近期还将完成展望未来NWS发展的第二份报告。

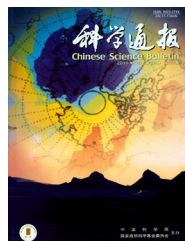


Tellus 2011年9月

本期推出第二次撒哈拉矿物沙尘试验（SAMUM-2）专辑。2006年和2008年分别开展了两次SAMUM项目外场试验，对沙尘的属性及其之间的关系，包括化学成分、形态、尺度分布和光学效应等，开展了全面调查。SAMUM-1试验在接近撒哈拉沙漠的摩洛哥南部进行，而SAMUM-2则在西非沙尘和生物燃烧烟尘溢出地的佛得角进行。专辑给出了外场试验和模式模拟以及与其他各种类似试验进行对比的结果。SAMUM试验首次使用多波段Raman/极化光达，空基高光谱分辨率光达也被广泛使用。专辑分综述、气象目标、实地观测、遥感、辐射传输和大气传输模拟等栏目共23篇论文，全面介绍了试验所获得的结果。

《大众科学》2011年11月

本期推出“数据就是力量”（DATA IS POWER）专题，多篇文章从人类文明史上的数据形成、人类对数据的认识以及数据对各领域科技发展和文明进步的推动等角度，向读者详尽介绍了数据之重要性。2011年全球可用数据数量预计将沿呈指数增加的曲线，增加到1.8ZB（ $10^{21}$ 比特），获得并用好各种数据成为社会发展的重要问题之一。

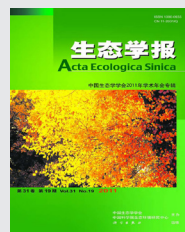


科学通报 2011年第27期

2011年春季，北极地区发生了有记录以来最严重的臭氧低值事件。该事件始于3月1日前后，直到4月5日以后才逐渐恢复。国家卫星气象中心的刘年庆等人利用我国新一代极地轨道气象卫星“风云三号”携带的紫外臭氧垂直探测仪资料，结合其他数据给出了这次事件的过程描述和分析。

《生态学报》  
2011年第19期

本期为中国生态学会2011年学术年会专辑。年会2011年10月在湖南长沙举办，主题为“创新生态科学，促进和谐发展”。专辑包括了全球变化生态方面的11篇论文，显示出此领域近年来快速发展的势头。论文涉及中国森林土壤碳储量及碳过程研究、植被对气候变化和人类活动响应、土壤呼吸和土壤碳循环、区域陆地碳循环和碳收支以及黄土高原地区的气候变化特征及对农业和生态影响等方面的研究。



## 媒体扫描

# MEDIA SCAN

《环球科学》2011年第10期

本刊是1845年创刊的《科学美国人》的中文版。本期推出了特别策划“未来城市创想”。世界人口数量已经达到70亿，预计到2050年将超过90亿，那时70%的人都将居住在城市里。专题中的“城市联盟应对气候变化”一文指出，依靠国际谈判，看来是没法解决温室气体排放问题了，一些城市决定试图自己解决问题，城市联盟应运而生。



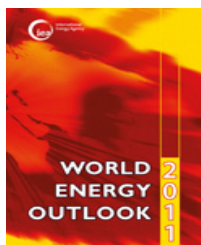
《全球二氧化碳排放长期趋势》2011年

在欧盟的资助下，由荷兰环境评估署完成的这份报告指出，继2009年全球二氧化碳排放下降1%后，2010年增加了5%，为过去20年之最。批准京都议定书的工业化国家和未批准的美国，在2010年排放较1990年减少了大约7.5%。报告指出，2010年中国人均排放为6.8吨，超过了法国的5.9吨，但低于美国的16.9吨。

《2011年世界能源展望》

由世界能源局编写的本年度报告，以“气候变化、煤、能源估计和石油”为主题，给出当前和今后25年全球能源市场的最新信息和分析，对一些领域给予了特别关注，例如：

- 俄罗斯能源预测
- 煤炭在经济增长和减排中作用
- 中东和北非石油、天然气投资
- 封闭高碳设施与2°C气候目标
- 化石燃料补贴与可再生能源

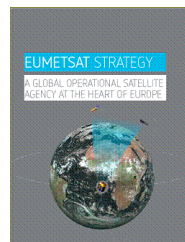


Science  
2011年11月11日

本期封面，给出2012年度AAAS（美国科学促进会，也是该刊的主办机构）年会的主题：平坦的世界——建设一个全球知识社会。这次年会将于2012年2月16日在加拿大举行，年会主题着眼于应对21世纪复杂和相互制约的挑战，希望通过国际化、多学科的努力，为给出全球解决方案铺设道路。

EUMETSAT：新战略出炉

EUMETSAT（欧洲气象卫星中心）2011年11月发表了新的战略。这份28页，以“位于欧洲心脏的全球业务卫星机构”为标题的战略，正如标题所言：立足欧洲，放眼世界。这份新战略是在今年6月EUMETSAT理事会上获得通过的。2011年11月发表的战略（第一版），给出了未来EUMETSAT活动的框架。战略给出了八个基本目标。借此战略的出炉，EUMETSAT表达了在未来发展中将具有世界影响力的雄心。



# Advances in Meteorological Science and Technology (Bimonthly)

Vol.1 No.4, December, 2011

**Supervisor** China Meteorological Administration (CMA)

**Sponsor** CMA Training Centre

**Honorary Editor** Chou Jifan

**Editor-in-Chief** Xu Xiaofeng

## Associate Editors

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Luo Yunfeng

Wang Huijun

Li Weijing

Hu Yongyun

Tan Zhemin

Fei Jianfang

Guan Zhaoyong

Zhou Dingwen

Huang Jianping

Liao Xiaohan

Lu Shihua

Jia Pengqun (executive)

## Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Peng, Zhang Qingyun, Zhao Ping

## Editors

Bi Baogui, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Feng Guolin, Guo Hu, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yurong, Hu Yuewen, Jiang Tong, Lei Xiaotu, Li Hui, Li Jiming, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Shi, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Li, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Mao Hengqing, Peng Yinghui, Pu Yifen, Shi Guangyu, Song Yan, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Xiaoyun, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zaizhi, Wang Zifa, Wen Min, Wen Hongtao, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yang Shaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Hua, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yande, Zou Liyao

## Overseas Editors

Chen Jingming, Li Jun, Liu Zhengyu, Jin Feifei, Wang Bin, Weng Fuzhong, Yang Song, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zou Xiaolei

## Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Hu Ying, Su Shipo, Chen Zhongmei

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,  
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

<http://library.cma.gov.cn/amst>

<http://weibo.com/2115232930/profile>

## Printed by

Beijing Baochang Color Printing Limited Corporation

ISSN 2095—1973

CN 10—1000/P

RMB 20.00

## Main Contents

(Special Issue: Space Weather)

Message from the Editor-in-Chief

## Article

- 6 Wang Jingsong/ Space Weather Operations in CMA  
13 Hu Yanqi et al/ Influences of Space Weather Events on the Spacecraft  
18 Guo Jianguang et al/ The International Space Weather Projects and Activities  
26 Lu Jianyong et al/ Advances in Space Weather Research  
37 Zhao Liang et al/ Progress in Studies on the Influence of Solar Activity on Climate Change during the Last 100 Years  
49 Hu Ying et al/ Bibliometric Analyses on the Field of Space Weather

## Forum

- 53 Wei Fengsi/ Considerations on the Development Strategy of the Space Weather Support and Service Capabilities in China  
57 Wang Huaning et al/ The Quickly Varying and Slowly Varying Feature of Solar Activity

## Reading

### Book Review

- 64 Li Weiguang et al/ Physics of Space Storms: From the Solar Surface to the Earth

## Information

- 48 New Publication  
62 Selected Papers

## History

### People/ Event

- 60 Jia Pengqun/ Space Weather Timeline

## Survey

- 2 Picture/ Number/ Ranking