

# 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, 空間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:** 空間天气, 空間天气业务

## 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 “空間天气”的出现

在“空間天气”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“空間物理学”(图1)。

据文献记载<sup>[3]</sup>, 类似“空間天气”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

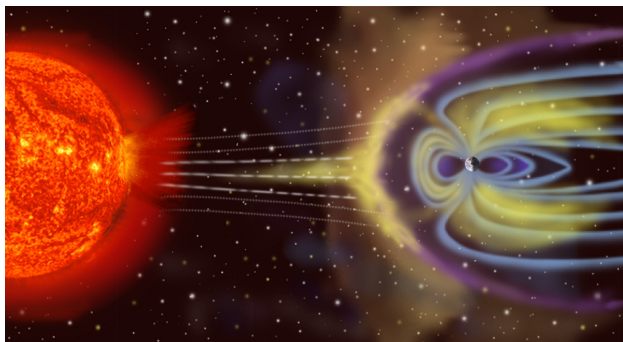


图1 日地空间: 太阳上喷发的物质和能量经过行星际空间后和地球的磁场相互作用, 并进一步扰动地球的高层大气、电离层等<sup>[2]</sup>

作为‘空間天气’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“空間环境”, 该术语被广泛使用<sup>[7]</sup>。需要注意的是, 空間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, 因此像空間碎片这样的非自然因素也是空間环境所关注的重要对象。

“空間天气”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将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“空間环境”主要关注航天系统不同, “空間天气”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/<br>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<br>（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

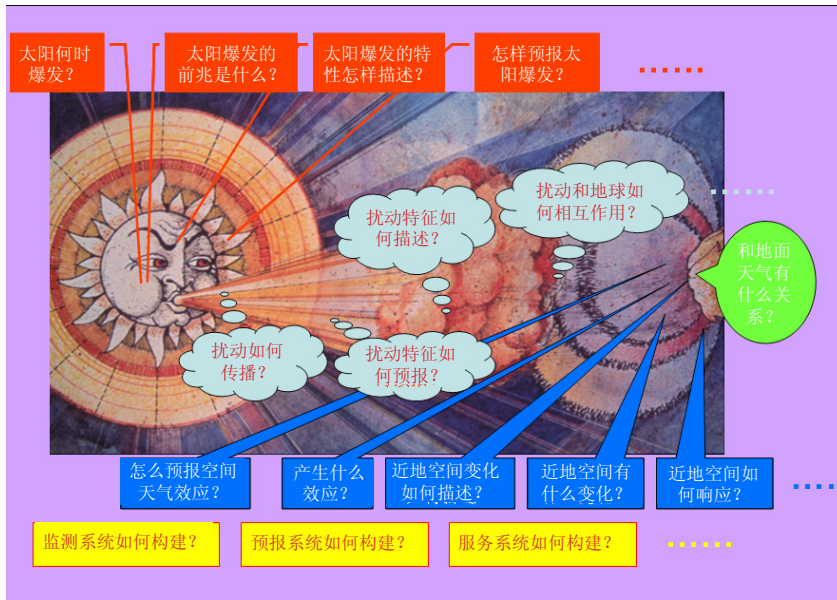


图3 空间天气业务涉及的主要问题

为NOAA海洋与大气研究办公室（OAR）下属的一个有浓重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，但随着地基台站的建设，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，并积极探讨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间天气应用分系统，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

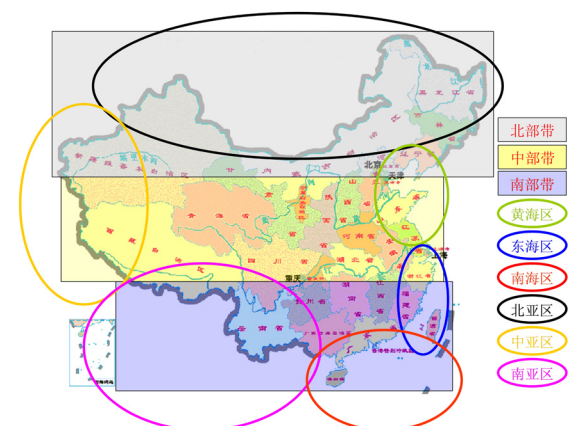


表3 空间天气地基监测能力

| 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

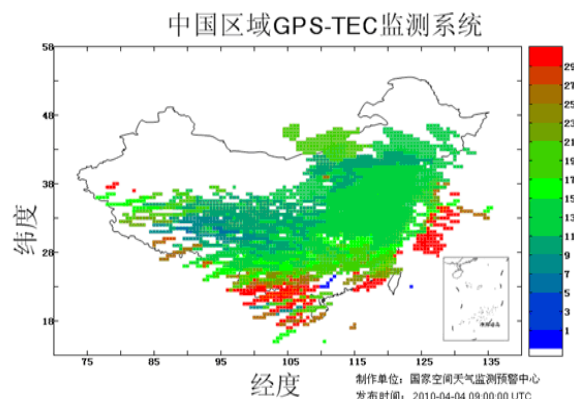


图4 地基建设三带六区布局（左）与GPS-TEC实时监测图（右）

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     | 24~72小时 |
|       | X级耀斑概率     |         |
|       | 质子事件概率     |         |
|       | 太阳黑子数中期预报  | 3~27天   |
|       | F107指数中期预报 | 3~27天   |
| 地磁活动  | 太阳黑子数长期预报  | 1~5年    |
|       | F107指数长期预报 |         |
|       | Ap指数       | 24~72小时 |
| 电离层天气 | 小地磁暴概率     |         |
|       | 大地磁暴概率     |         |
|       | 单站临频预报     | 24小时    |
|       | TEC现报      | 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应该存在的依据。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>。

中国气象局的空間天气业务从无到有，所有的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,中国气象局的空间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] 于晨, 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, 于晨. 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.