

气象卫星发展历程和启示

方宗义

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 简要地回顾了国内外气象卫星, 特别是业务气象卫星的发展及其更新换代的变化。简要地介绍了业务气象卫星的功能及其在大气科学、地球系统科学中的作用和地位。在此基础上, 探讨了由50多年来业务气象卫星快速发展的事实中得到的启示。

关键词: 业务气象卫星, 快速发展, 功能和作用, 启示

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.06.003

The Evolution of Meteorological Satellites and the Insight from It

Fang Zongyi

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: This paper briefly recollects the meteorological satellites at home and abroad, especially their development cause as well as renovative and generation replacement changes of the operational meteorological satellites. It gives an elementary introduction to their function, role and position in atmospheric sciences and systematic sciences concerning the earth. Furthermore, proceeding from such a basis, the paper probes into the revelation derived from the fact that operational meteorological satellites have made rapid progress in the past 50 years or more.

Keywords: operational meteorological satellite, rapid progress, function and role, revelation

1 引言

自1960年4月1日世界上首次成功发射气象卫星以来^[1], 已经过去半个多世纪了。空间技术和遥感技术的发展与进步, 地球科学和人类生存与发展的需求牵引, 气象卫星在天气分析预报、数值天气预报、气候监测和预测、生态和环境监测, 特别是在对热带气旋和中尺度强对流灾害性天气监测和预警方面的成效, 极大地促进了气象卫星和卫星气象学的发展。本文将在简要回顾和总结国内外气象卫星发展的历程、成就和作用的基础上, 探讨从中得到的启示。从过去半个多世纪气象卫星发展的历程中吸取成功的经验和失败的教训, 寻求一条适合中国国情、积极稳妥的发展中国气象卫星的道路。

2 气象卫星的发展历程

2.1 极轨气象卫星的发展历程

2.1.1 美国极轨气象卫星的发展

1960年4月1日, 美国发射了第一颗气象卫星“泰罗斯-1号”(TIROS-1, 电视红外观测卫星), 从而

开创了人类从太空探测地球大气的新纪元。截至1965年7月2日, 总共发射了10颗泰罗斯卫星, 这些卫星均携带光电摄影系统和红外辐射计, 前者用以在白天拍摄可见光图片, 后者昼夜均可工作。经过以上10颗气象卫星对卫星轨道(近极地太阳同步轨道)、自旋稳定的姿态控制(飞轮控制)、遥感探测器(光电摄像系统和红外辐射计)和图像传输方式(APT, 自动图像传输系统)等的试验验证, 直接导致了美国第一代试验业务气象卫星的诞生^[2]。

(1) 美国第一代试验业务气象卫星

1966—1969年, 美国共发射了9颗以环境勘测局(ESSA)命名的泰罗斯业务气象卫星(TOS)。此卫星由环境科学服务局(即后来的NESDIS)负责运行、管理。这一代卫星的主要功能是获取全球范围的白天云图和实现云图的直接分发服务。

(2) 美国第二代业务气象卫星

1970—1978年, 美国共发射了5颗以美国国家海洋和大气管理局(NOAA)命名的气象卫星(包括改进的泰罗斯卫星艾托斯和NOAA-1~5)。这是第一批采用三轴稳定姿态控制技术的业务气象卫星。星上的可见光及红外扫描辐射计(SR)和1972年开始采用的甚高分辨率扫描辐射计(VHRR)使卫星不但实现

收稿日期: 2013年8月2日; 修回日期: 2013年12月18日
第一作者: 方宗义(1938—), Email: fangzy@cma.gov.cn

了昼夜连续定量观测，还开始了多通道高分辨率扫描辐射观测。

(3) 美国第三代业务气象卫星

1978—1998年，美国共发射了新一代泰罗斯卫星（New Tiros）10颗，命名为TIROS-N和NOAA-6~NOAA-14。卫星的主要变化是由4个或5个通道的先进甚高分辨率扫描辐射计（AVHRR）代替了VHRR；增加了由高分辨率红外探测器（HIRS）、微波探测器（MSU）和平流层探测器（SSU）组成的探测大气温湿度垂直分布的仪器组合TOVS，同时还有太阳后向散射紫外辐射计（SBUV）和空间环境监测器（SEM）。气象卫星具有了同时获取多通道图像和大气温、湿度垂直分布的能力。

(4) 美国第四代业务气象卫星

1998—2009年，美国共发射了5颗先进的泰罗斯-N系列卫星，命名为NOAA-15~19。6通道的AVHRR代替了5通道的AVHRR，HIRS-2取代了HIRS，AMSU（A/B）代替了MSU和SSU。这些变化使气象卫星可以遥感有云情况下的大气温、湿度，实现了全天候的三维大气遥感探测，并能很好地区分云和雪。

(5) 美国第五代业务气象卫星

2011年NPP卫星的成功发射，标志着美国以NOAA命名的极轨业务气象卫星时代的结束和新一代以NPP/JPSS（联合极轨卫星系统）命名的极轨业务气象卫星时代的开始。NPP是NOAA-19与JPSS两代业务卫星之间的桥梁。JPSS计划发射两颗，JPSS-1、-2，预计在2017和2023年发射。NPP卫星主要装载5种仪器：可见光/红外成像辐射计（VIIRS）、先进技术微波探测器（ATMS）、跨轨扫描红外大气探测器（CrIS）、臭氧图像和廓线仪（OMPS）以及云和地球辐射能量系统（CERES）。星上的这些遥感探测器使它具有获取多通道图像、全天候气象要素三维分布、气溶胶和云的微物理特性、大气成分和地球大气辐射收支等地球物理参数的能力。

2.1.2 中国极轨气象卫星的发展

1988年9月7日，命名为“风云一号”的中国极轨气象卫星的第一颗卫星“FY-1A”发射成功^[3]。卫星获得了高质量的可见光图像，但是由于水汽对探测器件的污染，红外图像没有成功。1990年9月3日发射的“FY-1B”解决了红外图像获取问题。但因三轴稳定姿态控方面的问题，使“FY-1A”和“FY-1B”两颗卫星的寿命都没有达到设计要求。

(1) 中国第一代业务气象卫星

1999年5月10日发射的经过改进的“FY-1C”卫

星，其工作寿命超过了设计要求，探测通道由5个增加到10个。2002年5月15日发射的“FY-1D”卫星，其寿命超过7年。以上两颗极轨气象卫星构成了中国的第一代业务星。

(2) 中国第二代业务气象卫星

风云三号（FY-3）气象卫星是我国第二代极轨业务气象卫星，是FY-1号气象卫星技术的发展和提高^[4]。它具有探测大气三维要素和参数、大幅度提高全球资料获取能力，进一步提高对云区和地表特征的遥感能力，从而能够获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表和海表特性参数。FY-3A已于2008年5月27日发射升空，FY-3B于2010年11月5日发射，它们组成上午星和下午星，实现双星组网观测。FY-3A/B卫星遥感仪器涉及可见、红外、紫外、微波多个谱段，总共有11套仪器。表1和图1分别是FY-3A气象卫星携带的遥感仪器和卫星本体。FY-3,02批卫星为业务星，共有5颗，设计寿命5年，可以持续发展10年左右，其技术状态和水平与欧洲正在运行的METOP和美国正在发展的NPP极轨业务气象卫星接近。

2.1.3 欧洲极轨业务气象卫星的发展

欧洲气象卫星组织（EUMETSAT）的极轨气象卫星计划起步较晚，但起点高，其第一代极轨业务气象卫星就具有较高水平，发挥了很好的作用。

2006年欧洲气象卫星组织发射了第一代业务极轨气象卫星的第一颗星METOP-A，目前已进入业务运行状态。METOP系列由3颗卫星构成，METOP-B于2012年发射，METOP-C预计2017年发射。该系列卫星包括9种对地遥感仪器，其中具有显著特色的是红外大气干涉探测器（IASI）、全球臭氧监测仪（GOME）、GPS掩星探测器（GPS-S）、散射计（ASCAT）、空间环境监视器（SEM）。在9种仪器中有4项由美国NOAA提供，其余5项由欧洲自行研制。它的探测能力与美国的NPP相当。

2.2 地球静止气象卫星的发展历程

2.2.1 美国地球静止气象卫星的发展

1966年美国宇航局（NASA）发射了首颗地球静止卫星——应用技术卫星（ATS-1），在星上进行了多项试验，利用地球静止轨道进行气象探测的可能性是其中之一。星上的旋转扫描云相机（SSCC）成功地每20min获取一幅地球全圆盘可见光图像。此后，宇航局又发射了2颗地球同步轨道气象卫星（SMS），探测器为可见光及红外自旋扫描辐射计（VISSR）。

表1 FY-3A/B星载仪器基本参数

仪器名称	光谱范围	光谱通道数	扫描宽度 (°)	星下点分辨率 (km)	量化等级 (bit)	主要应用
可见光及红外扫描辐射计 (VIRR)	0.44~12.5μm	10	±55.4	1.1	10	云、植被、雪、冰、陆/海表温度, 气溶胶, 火点等。
红外分光计 (IRAS)	0.69~15.5μm	26	±49.5	17	13	大气温、湿度廓线, 射出长波辐射等
微波温度计 (MWTS)	50~57GHz	4	48.6	50	13	大气温度廓线、地表辐射率
微波湿度计 (MWHS)	150~183GHz	5	±48.95	15	14	大气湿度廓线、降水强度
中分辨率光谱成像仪 (MERSI)	0.41~12.5μm	20	±55.4	0.25~1.1	12	真彩色图像, 云、植被、陆地覆盖类型, 海色等。
紫外臭氧垂直探测仪 (SBUS)	252~340nm	12	星下点	200	12	O3垂直分布
紫外臭氧总量探测仪 (TOU)	309~361nm	6	±56.0	50	12	O3总量
微波成像仪 (MWRI)	10.65~89GHz	10	±45.0	9~85	12	降水和云水、大气可降水、地表土壤水分、积雪等。
地球辐射监测仪 (ERM)	0.2~3.8μm 0.2~50μm	2	±50.0	35	16	反射太阳辐射通量 射出长波辐射通量
太阳辐射监测仪 (SIM)	0.2~50μm	1			16	太阳常数
空间环境监测仪 (SEM)	3.0~300Mev 0.15~5.7Mev					探测高能粒子、星体内辐射容量、卫星表面电位差和粒子事件等

(1) 美国第一代业务静止气象卫星

1975—1978年, 美国共发射了3颗命名为地球同步业务环境卫星GOES-1~3的地球静止业务气象卫星。星上的主要遥感探测器是可见光及红外自旋扫描辐射计。

(2) 美国的第二代业务静止气象卫星

1980—1987年, 美国共发射了4颗GOES卫星, 即GOES-4~7。星上的主要变化是在VISSR上增加了探测大气温、湿度垂直分布的能力, 即VISSR的大气探测器 (VAS, 可见光及红外自旋扫描辐射计大气探测器), 以上两代卫星的姿态都是自旋稳定。

(3) 美国第三代业务静止气象卫星

1994—2001年, 美国发射了GOES-8~12共5颗第三代业务静止气象卫星。其最大的改进是采用了三轴稳定的卫星姿态控制技术, 使成像与垂直探测独立同时进行, 对局部区域可以进行高频次监测。

(4) 美国第四代业务静止气象卫星

当前运行的GOES-13~15为第四代业务静止气象

卫星 (2006—2010年), 星上有5通道成像辐射计、19通道大气探测器、空间环境监视器和太阳X-Ray成像仪。

美国再下一代业务静止气象卫星的第一颗卫星GOES-R, 计划于2016年发射。星上的主要探测器是先进基线成像仪 (ABI)、闪电成像仪 (GLM)、空间环境监测器 (SEISS)、太阳紫外成像仪 (SUVI)、远紫外和X射线辐照度探测器 (EXIS) 以及磁力计 (MAG)。其中的ABI由16个探测通道组成, 包括6个可见光和近红外通道、10个红外通道, 空间分辨率为可见光0.5km, 近红外1km, 红外2km, 全圆盘图成像时间约5min。它具有分辨率更高、通道更多和速度更快的成像能力。同时, 它也将显著地增强对空间环境的监测能力。

2.2.2 欧洲静止气象卫星的发展

欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 于1977年发射第一颗静止气象卫星Meteosat-1, 卫星采用自旋稳定的姿态控制方式, 星上主要载荷为3通道可见和红外自旋扫描辐射计 (VISSR), 该星发射成功后, 由VISSR中的水汽通道获取的图像是全球第一幅水汽图像。

(1) 欧洲第一代业务静止气象卫星

1977—2001年, 欧洲气象卫星组织共发射和运行了7颗与Meteosat-1同一型号的静止气象卫星 (包括Meteosat-1), 成为欧洲的第一代星。

(2) 欧洲第二代业务静止气象卫星

第二代星由4颗卫星组成。2002—2012年已发射3颗, 命名为Meteosat-8~10。卫星仍然采用自旋稳定的姿态控制方式, 但扫描辐射计的通道数增加到12个, 空间分辨率可见光通道1km, 红外和水汽通道3km, 全圆盘观测时间15min, 数据量化等级10bit。

(3) 欧洲再下一代业务静止气象卫星

EUMETSAT计划中的第三代业务静止气象卫星

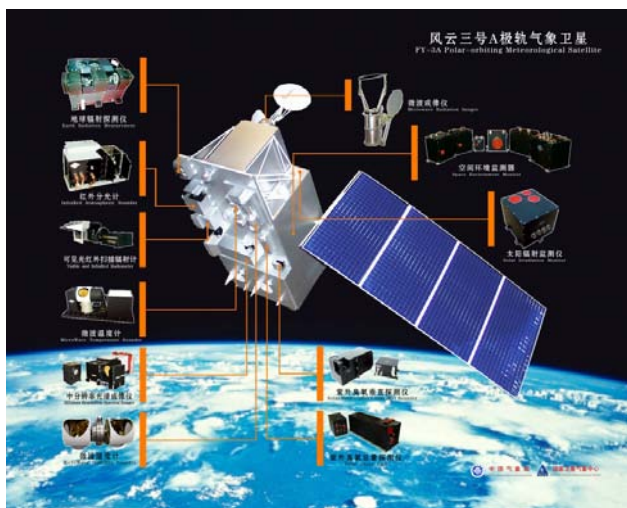


图1 风云三号极轨气象卫星

MTG的第一颗星将于2020年发射。卫星将采用三轴稳定的姿态控制方式，携带的新型多光谱成像仪和大气垂直探测器将大大地增强其探测能力。

2.2.3 中国业务静止气象卫星的发展

1986年，我国第一颗静止气象卫星“风云二号”正式列入国家计划。第一颗卫星于1997年6月10日在西昌卫星发射基地发射，被命名为“FY-2A”。卫星的主要遥感观测仪器是多通道可见光及红外扫描辐射仪。由于消旋天线故障，“FY-2A”卫星没有达到设计寿命。2000年6月25日发射的“FY-2B”卫星也未达到设计寿命。

(1) 中国第一代业务静止气象卫星

2004—2012年，中国共发射了4颗业务静止气象卫星FY-2C~2F。与试验星相比，其主要发展是星上的可见光及红外自旋扫描辐射仪的探测通道由3个增加到5个，数据量化等级增至10bit。计划中第一代业务静止气象卫星还有两颗，即FY-2G和-2H。

(2) 中国下一代业务静止气象卫星

中国第二代业务静止气象卫星FY-4计划于2015年前后发射，它将由4颗卫星组成。卫星将采用三轴稳定姿控方式，主要载荷为：多通道成像仪、傅里叶红外大气探测仪、闪电成像仪和空间天气监测仪器组等。其中多通道成像仪具有14个通道，波长范围0.45~13.8 μm 。可见光图像水平分辨率为0.5~1km，红外和水汽为2km。全圆盘图成像时间15min，区域图3000km \times 3000km，3~5min，区域和时段可选。这将极大地增强对暴雨、强对流等中小尺度灾害性天气系统的监测能力。

2.2.4 日本和印度业务静止气象卫星的发展

日本和印度也是业务静止气象卫星的运行国家，但情况相对简单，简要情况如下。

日本于1977年发射第一颗业务静止气象卫星向日葵1号(Himawari-1)，定位于140°E的赤道上空。星上的主要遥感探测器是可见光及红外自旋扫描辐射仪。1977—1995年，共发射5颗同类卫星，对外统称为GMS-1~5。2005和2006年日本分别发射多功能卫星(MTSAT-IR和MTSAT-2)接替GMS卫星工作。与此前的GMS卫星相比，除卫星的姿态改为三轴稳定的姿控方式外，星上的遥感探测器和卫星的功能变化不大。日本于2014年底发射业务静止气象卫星向日葵8号(Himawari-8)。卫星装载先进的向日葵成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI)。AHI共有16个通道，可见光分辨率为0.5/1km，红外分辨率为2km，成像仪正常扫描获得全圆盘图，时间小于

10min，也可在选定的时间对特定区域进行扫描，每2.5min获得一幅区域图像。卫星的资料发送方式也会有一定的变化。

印度是较早发射和运行静止气象卫星的国家。但长时期以来都采用区域波束传送资料，周边国家难以共享其成果，因而对其关注度不高。第一代INSAT-1卫星共4颗，第一颗INSAT-1A于1982年4月发射。

第二代INSAT-2卫星共5颗，卫星装载了三通道VHRR成像仪，可见光通道分辨率为2km，红外通道分辨率为8km，每30min得到一帧全圆盘图像。第三代INSAT-3卫星共计6颗，装载了三通道VHRR成像仪和三通道(VIS/NIR/SWIR) CCD电荷耦合器件成像仪，分辨率为1km。

2.3 对地观测和科学试验卫星

为了试验新型遥感探测器的性能，为了为重大的国际地球科学试验获取信息，一些国家的空间科学技术机构发射了许多专用的科学试验卫星和对地观测卫星，在国际科学活动中发挥了重要作用。其中有大家所熟知的美国国家航空航天局(NASA)的雨云卫星计划(Nimbus)，NASA与日本空间探测局(JAXA)合作的“热带降水测量任务”卫星计划(TRMM)，NASA为行星使命计划发射的地球观测系统(EOS的Terra和Aqua等卫星)，欧空局(ESA)的环境卫星(ENVISAT)，印度空间研究组织(ISRO)的海洋水色测量卫星(OCEANSAT2)等。

为了利用多颗携带有不同探测器的卫星同时对地球大气进行综合观测，以便更好地了解地球系统各圈层及其相互作用，NASA还组织了有明确科学目标的“A-Train”卫星队列观测计划。这些卫星在太阳同步轨道上运行，过赤道的地方时大约在13:30，相差时间在几秒到几分钟之内，几乎可认为对同一地点是同时观测。目前有6个卫星在“A-Train”队列中运行，如表2所示。

2.4 空间导航卫星系统(GNSS)在气象领域中的应用

导航卫星的基本功能是定位、导航和授时，这些功能在军事和民用的诸多方面均得到重要而广泛的应用。除此之外，它在地球科学的一些分支学科也具有重要的应用价值。如：定位在测绘科学技术和地壳形变监测中的应用；米级定位精度的功能在气象探空气球定位、跟踪方面的应用等。另一方面，把GNSS发射的电磁波作为双分雷达的发射端，利用地面、飞机和低轨卫星等平台上安装的高精度接收机作为接收端，通过在地面接收GNSS电磁波的直接信号，低轨

表2 A-Train队列卫星

卫星	运行机构	发射时间 (年)	主要载荷
EOS-Aqua	NASA	2002	大气红外探测器 (AIRS)、先进微波探测装置 (AMSU-A)、湿度探测器 (HSB)、先进微波扫描辐射计 (AMSR-E)、中分辨率成像光谱仪 (MODIS)、云和地球辐射能量系统 (CERES)
Aura	NASA/BNSC	2004	高分辨率动力学临边探测器 (HIRDLS)、微波临边探测器 (MLS)、臭氧监测仪 (OMI)、对流层发射光谱分光计 (TES)
PARASOL	CNES	2004	地球反射率极化和方向性测量仪 (POLDER)
CALIPSO	NASA/CNES	2006	云-气溶胶正交极化激光雷达 (CALIOP)、成像红外辐射计 (IIR)、宽视场照相机 (WFC)
CloudSAT	NASA/CSA	2006	云廓线雷达 (CPR: 94GHz)
GCOM-W1	JAXA	2012	先进微波扫描辐射计 (AMSR2)

卫星上的接收机在临边状态下接收经过大气折射的掩星信号或经过海面、地面散射、反射的GNSS信号，可以反演整层大气的水汽总量，大气温、湿度垂直分布，海表的粗糙度、浪和风，地表的介电常数和土壤湿度等。这些参数都是地球系统科学研究中必不可少的，但要在全球尺度上监测这些大气和地球物理参数是一件极为困难的事情。GNSS在这方面的应用对地球系统科学真是雪中送炭。

在20世纪90年代利用GPS（由美国发射的GNSS卫星系统中的类型之一）接收机接收的经过与大气相互作用的GNSS信号，获取大气参数的工作取得了两大进展。一是利用地基高精度GPS接收机信号，计算整个气柱的水汽总量。这项工作已在多个国家得到推广使用，中国也在21世纪的前10年，利用国家和地方的联合项目，建成了覆盖全国的高精度GNSS接收机网，具有获取全国范围高时间频次大气水汽总量分布的能力。二是利用安装在低轨卫星上的高精度GNSS接收机，利用它在掩星状态下获取的穿过大气密度分布不均匀的GNSS信号，在掩星状态下信号会发生折射，通过对这种电磁波弯曲率的反演，就可以得到大气温度、湿度的垂直分布。

由于无线电掩星探测具有不需要辐射定标、垂直分辨率高、性能价格比高和全天候观测等突出优点，因而受到广泛重视，得到迅速发展。国外，在20世纪90年代开始此项研究，并在21世纪初投入业务。2006年由美国和台湾联合研制与发射运行的COSMIC计划，获取了大量掩星探测资料，在数值天气预报中发挥了显著作用。ECMWF的资料表明，在输入模式的23种遥感资料中，空间导航卫星—掩星探测资料的作用排在第5位（也有人排在第2或第3位）。目前在美国和欧洲的业务极轨气象卫星上均有导航卫星—掩星接收机。我国在21世纪前10年开始研究，并进行了星载试验。2013年9月23日发射的FY-3 02批卫星上安装有针对GPS和中国北斗两类导航卫星的掩星接收机，进行遥感大气参数垂直分布的业务试验。初步结果表明，利用北斗导航卫星掩星信号反演得到的大气

温、湿度垂直分布的精度与利用GPS卫星掩星信号反演的精度大体相当。差别在于GPS是全球星座由FY-3得到的掩星事件多，每天全球约有576个。目前的北斗导航卫星是针对我国及周边地区的区域星座，因而获取全球资料的能力与GPS有差距，每天全球约有184个掩星事件。

2.5 全球业务气象卫星探测系统

全球业务气象卫星探测系统是在WMO协调下，在各气象卫星发射和运行国家的共同努力下建成的地基探测系统。

图2是目前正在运行的全球业务气象卫星探测系统，由极轨和静止两类轨道卫星组成。正在业务运行的极轨气象卫星有美国的NOAA（即图上的TIROS，下一步将被JPSS替代）、俄罗斯的流星系列气象卫星（METEOR）、中国风云系列卫星（FY-3），以及欧洲气象卫星组织的极轨气象卫星（Metop）。位于赤道平面上离地面35800km高度的地球静止气象卫星有中国的风云二号D和E星（105°E和86.5°E）、日本的MTSAT（140°E）、美国的地球静止业务环境卫星西（GOES-W，135°W）、美国的地球静止业务环境卫星东（GOES-E，70°W）、欧洲气象卫星组织的METEOSAT（0°E）以及另一颗METEOSAT

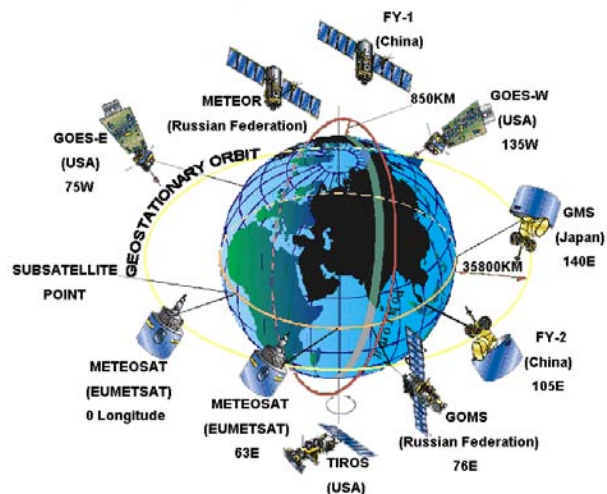


图2 全球业务气象卫星探测系统（来自WMO，2009年）

(63°E)，它是欧洲气象卫星组织为了支持印度洋的季风试验而从其备份位置移到印度洋实施观测任务。

图2上的业务气象卫星观测系统实现了高空间分辨率和高时间分辨率的全球探测，其观测资料已经在各国的天气分析预报、数值预报、短期气候预测、各种大气科学研究项目和世界气象组织协调的大型科学研究计划（如WCRP、IPCC）中发挥着重大的、基础性的作用。

3 气象卫星的功能和作用

3.1 气象卫星云图在天气分析和预报中的作用

卫星云图已经成为认识、理解和帮助分析天气尺度系统的重要辅助工具。它是海洋上监测热带气旋、确定中心位置、估计其强度和大风范围的主要手段；是监测、分析中尺度天气系统并对其制作临近预报和预警的重要工具。卫星云图揭示出的海上细胞状云型的形成和演变，大陆上中尺度对流云团的发展和演变，斜压叶状云型向气旋云系的发展演变过程等观测事实，都丰富和发展了天气学的相关内容^[5-7]。

3.2 气象卫星资料对数值天气预报的作用和影响

长期以来，由于卫星反演产品的精度不够高、卫星探测方式与常规探测不同，直到20世纪80年代，气象卫星资料对数值预报模式的影响甚微，在一些地区甚至出现负效应。1989年Eyre^[8]率先提出了在数值预报模式中直接同化卫星遥感辐射率问题，使卫星资料在数值预报模式中的应用发生了质的飞跃。目前，美国和ECMWF的业务数值预报模式系统中，输入的观

测资料有85%来自卫星的辐射测值和加工处理出来的各种要素和参数。图3是2007年ECMWF业务数值预报模式同化卫星资料后对预报结果的影响图。它表明，在模式中同化气象卫星遥感资料后，北半球的预报时效延长了3~4天，南半球延长了3天。

随着卫星探测得到的辐射率种类增多、精度提高，数值预报模式对初值的同化技术不断发展，其作用将会更加显著。

3.3 气象卫星资料在气候变化监测、预测和研究中的作用

由长时间序列卫星遥感资料生成的多种气象要素、参数的时间序列产品是气候监测、研究、预测的重要基础信息。例如：由ISCCP项目得到的各种类型和不同分辨率的云参数已经广泛的应用于气候监测、短期气候预测、气候诊断分析研究和气候数值模拟，以及气候模式检验等许多方面。又如：全球大气温度的长时间变化是一个非常重要的气候问题，但利用常规探测又难以得到可信的结论。利用经过重新标定和校准的NOAA卫星长时间序列的微波探测器（MSU）资料，得到了1979—2001年时段内对流层中部和平流层下部大气温度的变化趋势。图4^[9]清楚地揭露出对流层中部温度上升和平流层下部温度下降这一事实。

3.4 大气成分的卫星遥感监测

大气成分的微小变化都会影响人类的生存环境，利用卫星遥感技术监测大气成分及其变化就成为近年来对地观测卫星发展的前沿。20世纪末和21世纪初各国为此发射了一系列卫星，如：1995年发射的ERS-2

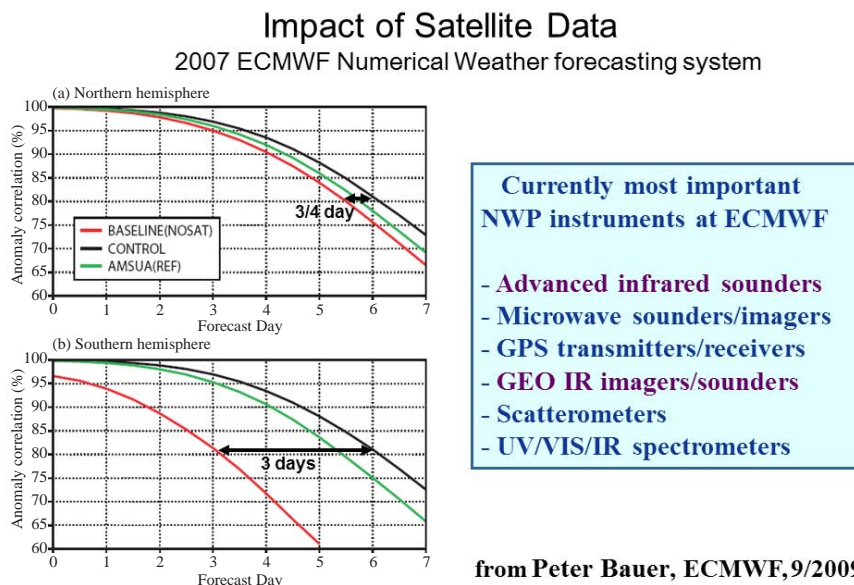


图3 2007年ECMWF业务数值预报模式同化卫星资料后对预报结果的影响 (a) 北半球；(b) 南半球

上的全球臭氧监测仪 (Global Ozone Monitoring, GOME)^[10]; 欧洲空间局 (ESA) 在2002年3月1日发射的大型环境监测卫星 (ENVISAT-1) 上的“扫描成像吸收光谱大气制图仪” (SCIAMACHY); 美国国家航空航天局 (NASA) 于2004年7月15日发射的 Aura 地球观测系统卫星上携带的臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI); 2008年7月25日我国发射的云三号01试验星上搭载的大气成分探测仪 (TOU/SBUS); 2009年1月23日美国发射的温室气体卫星 (GOSAT) 等。

利用这些卫星遥感资料得到的大气温室气体和污染气体的分布和变化, 是环境和气候监测的重要手段。

3.5 环境和自然灾害监测中的应用

监测地球系统五大圈层的现状和演变是对地观测卫星的职能。过去30多年, 已经生成了大量由 AVHRR 加工处理得到的日、候、旬、月平均的 SST 资料, 及其多年平均值和距平。这些资料在 El Niño 等与海洋活动密切相关的重大气候事件的监测中发挥了很好的作用, 并投入业务应用。由 AVHRR 资料加工处理得到的 NDVI 是监测地球表面植被生长状况和进行作物估产的有效手段。已经积累起来的几十年 NDVI 数据是监测全球生物生长状况, 及其季节变化和年际变化的基

本依据。从气象卫星上天开始, 就利用光导摄像云图监测地表积雪和海冰。随着业务气象卫星的连续观测和卫星遥感技术的发展, 不仅积累了长时间序列的全球积雪覆盖和海冰资料, 了解积雪和海冰的季节变化和年变化, 还能监测新雪和旧雪、一年冰和多年冰, 以及雪深和雪水当量。

气象卫星在高温热源、城市热岛和大范围森林火灾监测方面的应用已广为人知。把气象卫星降水估计与卫星对洪涝的监测结合起来, 已经在抗洪抢险中发挥了很好的作用。卫星对沙尘暴和气溶胶的监测也是近年来业务应用服务的内容之一。

4 气象卫星发展变化的启示和讨论

(1) 气象卫星从诞生到现在历经了53年, 以美国为代表的极轨业务气象卫星已进入第五代, 静止气象卫星也已进入第四代, 大约每10年就进行一次更新换代。其他国家的情况大体相当。气象卫星经过这么多年的发展, 目前通过星上遥感探测器波段、探测通道、极化、扫描方式和主、被动遥感等方式的选择和卫星姿态与轨道等的选择, 已经实现了对地球大气气象要素的三维探测, 大气成分探测, 大气中云和气溶胶物理特性探测。对地球系统其余四大圈层的物理、化学特性也具有相当的探测能力。卫星遥感器性能大幅度提高, 探测资料的种类和精度更加适合气象业务的需求。卫星的寿命不断增加, 使更新换代的时间间隔也相应延长。保证气象业务的业务气象卫星和满足各种气象科学试验、科学研究的试验气象卫星并行发展的势头方兴未艾。因此, 气象卫星正在成为地球大气探测系统诸多技术、设备和手段的核心, 它在地球系统科学中的作用和地位将愈来愈重要和显著。

(2) 气象卫星发展的特点是以正确的科学思想 (即以在空间的人造地球卫星作为观测平台, 对地球大气进行遥感探测的可行性) 为指导, 以学科 (大气科学、地球系统科学) 发展和社会、经济需求为牵引, 在高新技术 (空间技术、遥感技术、通信和计算机技术) 的支撑下发展起来的。

(3) 为什么气象卫星发展如此之快? 大气科学、地球系统科学和气象业务与服务对气象卫星有巨大的需求; 气象卫星的强大探测能力和表现出来的勃勃生机, 使它有完成现代大气科学和地球系统科学所赋予它的探测任务; 飞速发展的空间技术、遥感技术和通信计算机技术为气象卫星的更新换代提供了强大的技术支撑; 国家的财力是它能否立项和得到持续发展的基础。所以, 它是需求、能力、技术水平和财力之间的平衡和取舍的结果。

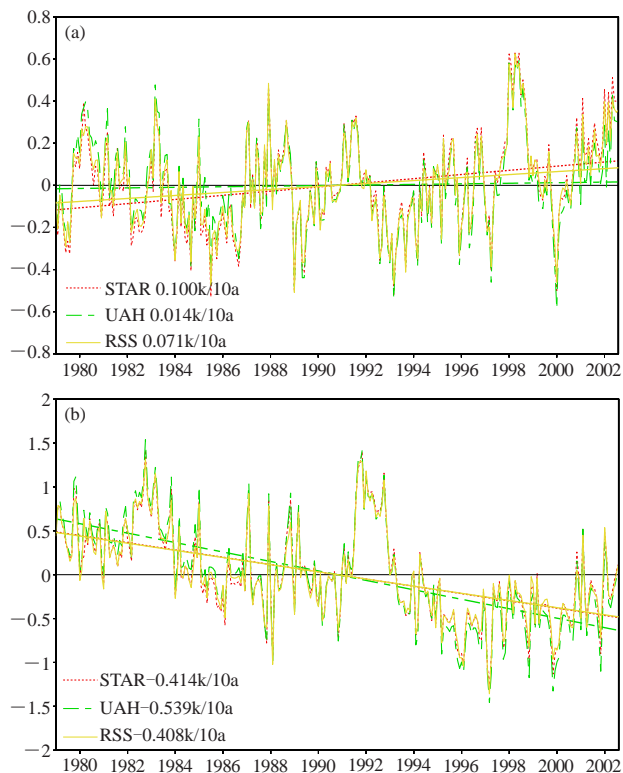


图4 由三个小组处理的MSU数据估计得到的1979—2001年全球高空大气温度变化趋势
(a) 对流层中层, (b) 平流层低层

(4) 研制、发射和运行两类不同轨道的业务气象卫星序列是一项耗资巨大的事业，如何充分论证其需求，如何处理好气象卫星与其他对地观测卫星的关系，切实做到避免重复、资源共享。切不要环境、减灾、资源、海洋和气象等卫星序列满天飞。在国外，气象卫星就是环境卫星。如：美国，在ESSA、GOES、NPOESS等气象卫星的命名中均有“环境”(Environment)一词包含其中。

(5) 大气科学、地球系统科学均有许多未知的领域需要探索。气象卫星本身在发展成熟进入业务阶段之前，也有一些空间技术、遥感技术，甚至一些通信和信息储存技术也需要在卫星上试验。因此，采用业务气象卫星和试验气象卫星同时发展；多功能的综合型大卫星和探测功能的任务相对单一的小卫星同时发展的策略是恰当的。

(6) 研制、发射和运行气象卫星必须走“独立自主、自力更生”的道路。发展气象卫星所需要的高新技术中的关键技术是买不来的。

参考文献

- [1] Rao P K, Holmes S J, Anderson R K, et al. Weather Satellites: Systems, Data, and Environmental Applications. Boston: Amer Meteor Soc, 1990.
- [2] 李俊, 方宗义. 气象卫星的发展——机遇与挑战. 气象, 2012, 38(2): 129-146.
- [3] 杨军. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [4] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [5] 陶诗言, 方宗义, 李玉兰, 等. 气象卫星资料在我国天气分析和预报上的应用. 大气科学, 1979, 3(3): 239-246.
- [6] Smith W L, Bishop W P, Dvorak V F, et al. The meteorological satellite: Overview of 25 years of operation. Science, 1986, 231: 455-462.
- [7] Dvorak V F. Tropical Cyclone Intensity Analysis Using Satellite Data. Washington D C: NOAA Tech Rep, NESDIS 11, 1984.
- [8] Eyre J R, Lore A C. Direct use of satellite sounding radiances in NWP. Meteo Maganize, 1989, 118: 13-16.
- [9] 廖蜜, 张鹏, 吴雪宝, 等. 利用MSU序列研究高空大气温度变化的进展. 气象, 2011, 37(9): 1151-1157.
- [10] European Space Agency. GOME Global Ozone Measuring Experiment Users Manual. ESA SP-1182. Noordwijk: ESA/ESTEC, 1995.

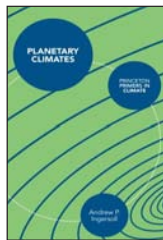
新书架 NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



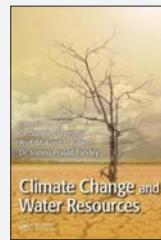
Horizons in Earth Science Research
《地球科学研究的视野》

编著者: Benjamin Veress等
出版者: Nova Science
Publishers Inc
出版年: 2014



Planetary Climates
《行星气候》

编著者: Andrew P. Ingersoll
出版者: Princeton University
Press
出版年: 2013



Climate Change and Water
Resources
《气候变化与水资源》

编著者: Sangam Shrestha等
出版者: CRC Press
出版年: 2014



Earth System History
(4th Revised edition)
《地球系统历史》(第4修订版)

编著者: Steven M. Stanley
出版者: W.h.freeman & Co Ltd
出版年: 2014