

风云气象卫星40年：国际背景下的发展足迹

杨军 许健民 董超华

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 经过40年的艰苦努力, 我国独立自主地发展了风云极轨和静止气象卫星系列, 实现了气象卫星的业务化应用。回顾了气象卫星发展过程中重大的历史事件, 站在国际视野的角度, 对我国风云气象卫星的发展进行了概括总结, 并与发达国家的技术水平进行了对比。同时, 也简要介绍了风云气象卫星资料在天气、气候、自然灾害和环境监测以及在农业中的应用。

1 国际和中国气象卫星发展过程中的重要历史事件

1.1 第一颗气象卫星的诞生, 从空间观测地球概念的萌发

1954年, 美国俘获的德国V2火箭携带相机从高空拍摄了地球照片。这些照片交给了美国兰德公司进行评估。作为评估专家的著名气象学家Bjckness高度评价了自上而下观测云图的潜在应用价值。于是发展气象卫星被列入美国的空间计划。1960年4月1日, 美国发射了第一颗极轨气象卫星“泰罗斯-1号”(TIROS-1, 电视红外观测卫星), 利用电视摄像技术首次获得了显示大尺度天气系统特征的完整的卫星云图。从卫星上观测到的云图与先前用探空资料得到的天气系统概念模型十分相似, 这极大地激发了人们从空间观测地球的热情。用气象卫星进行遥感观测的新时代从此开始^[1]。

截至1965年7月2日, 美国总共发射了10颗试验性泰罗斯卫星, 这些卫星携带光电摄像系统和红外辐射计等实验仪器, 前者用以在白天拍摄可见光图片, 后者昼夜均可工作。这一阶段为极轨气象卫星在观测和业务化技术上奠定了基础, 卫星气象学开始萌芽, 根据Oliver等的研究, 急流、对流层中部的槽线和脊线、涡度中心均可以轻松地卫星云图上标定出来。

紧接泰罗斯系列实验卫星的是9颗泰罗斯系列业务卫星“托斯”(TOS), 这些卫星于1966到1969年间发射, 命名为“艾萨”(ESSA, 环境探测卫星)。同时, 美国还研发了一系列“雨云”(NIMBUS)实验卫星, 作为未来极轨业务卫星技术的测试平台。

这一阶段为成像仪器应用于天气分析预报的初期阶段, 逐步形成了以云的定性解析为基础的卫星气象学。同时, 成像类扫描辐射计和大气探测仪器也开始发展。

1969年1月, 由于强冷空气侵袭, 在长江、黄河流域出现了严重的冰凌灾害, 造成我国大范围电信中断。美国气象卫星的云图上反映了造成这一灾害的天气情况。周恩来总理在听取了气象、邮电、铁道等部门的汇报后指出: “要搞我国自己的气象卫星。在我国的气象卫星没有出来以前, 要想办法接收、利用外国气象卫星的资料。”从此, 中国的气象卫星计划启动^[2]。

1.2 极轨气象卫星的数据直接广播和气象卫星服务的业务化

继“艾萨”之后, 美国宣布发展改进的“托斯”系列, 该极轨系列包含6颗卫星(ITOS-1, NOAA-1~5), 首次在同一颗卫星上实现了全球覆盖资料的收集和自动云图传输。

1970年1月发射的ITOS-1是该系列首星, 该卫星实现了全球云图数据在卫星上的存储, 经过延时后到地面接收站回放, 但未能实现云图的实时播放。1972年10月15号发射的ITOS-D即“诺阿-2”(NOAA-2)卫星对云图业务意义重大, 它采用扫描辐射计取代了电视摄像技术进行云图观测, 并开始进行数据直接广播。数据直接广播使广大气象台站能够获得实时资料, 标志着气象卫星的业务化, 并带动用户广泛使用卫星云图, 使气象卫星的应用水平快速提高。

这一阶段是气象卫星的业务初级阶段。气象卫星数据开始在天气预报中发挥重要作用。比如, 早期就有人提出利用卫星云图定位和跟踪热带风暴, 但这个想法到了卫星能够提供连续的云图后, 就成为日常预报项目之一^[3]。

我国陶诗言、丁一汇、方宗义等人敏感地意识到气象卫星云图对天气预报的重要意义, 将国外卫星云图接收、使用技术介绍到中国来, 并对云图在中国天气分析和预报中的应用做了大量的研究工作, 使气象卫星云图应用技术在中国开始普及^[4]。

与此同时, 我国的气象卫星研制工作开始了艰难起步。1970年, 我国决定发展极轨气象卫星, 并提出了第一颗气象卫星的目标任务。1977年, 中国科学院上海技术物理研究所研制出了两通道(可见光和红

收稿日期: 2011年5月13日, 修回日期: 2011年6月5日

第一作者: 杨军(1964—), Email: junyang@cma.gov.cn

外)扫描辐射计样机,并进行了飞行试验。

1.3 气象卫星观测数据的数字化和卫星观测资料的定量应用

最初的气象卫星发回的观测数据都是模拟数据。观测资料没有进行严格的定标,在传输的过程中还引入了误差。1978年10月,具有标志性意义的“泰罗斯-N”(TIROS-N)卫星发射,它的成像系统是一台四通道先进甚高分辨率辐射计(AVHRR)。Rao等^[1]认为通过这次改进“不仅能提供昼夜不间断的红外及可见光图像,还能提供海面温度、估算热量收支、识别雪和海冰”。AVHRR很快便升级成一个5通道的系统,所有通道的星下点分辨率都达到1.1千米。以下通道是该成像系统的主要部分:a) 0.58~0.68微米;b) 0.72~1.10微米;c) 3.55~3.93微米;d) 10.30~11.30微米;e) 11.50~12.50微米,该仪器的光谱通道一直沿用到今天。TIROS-N卫星将AVHRR的观测数据进行了数字化,实现了数据的数字化传输,气象卫星应用从定性走向定量。从1978年到1998年,美国共发射了10颗业务气象卫星(TIROS-N/NOAA-6~14),气象卫星进入业务稳定阶段,气象卫星资料在全球得到广泛应用,应用水平得到极大提高。

同一时期,我国的气象卫星却在进行艰苦的研制和反复试验。1988年9月7日,我国第一代风云一号气象卫星的首发星FY-1A发射成功。FY-1A携带5通道可见光红外扫描辐射计,该仪器与美国TIROS-N/AVHRR仪器性能接近,只是缺少3.5微米通道,但多了一个水色通道。FY-1A不仅实现了实时资料直接广播和全球资料收集,而且一步跨越采用数字化传输技术;地面应用系统由一个资料处理中心和三个国内地面站组成(北京、广州、乌鲁木齐),实现了卫星资料的接收、处理、存档和监测服务。但由于姿控系统故障,FY-1A在轨工作39天即宣布失效,之后的第二颗试验卫星FY-1B也未能达到设计寿命。

1999年5月10日,风云一号C星(FY-1C)成功发

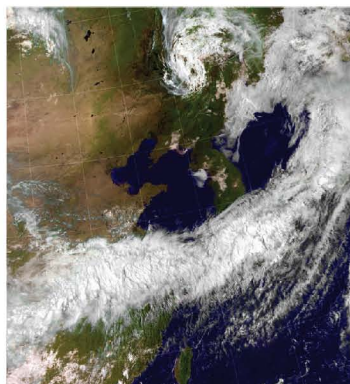


图1 FY-1C可见光红外扫描辐射计多通道合成图像(1999年6月27日)

射。该星装载改进的10通道可见光红外扫描辐射计,并首次实现我国气象卫星的业务化运行,具有重大的里程碑意义。FY-1C具有良好的成像质量,在轨工作超过5年,大大超过设计寿命。图1是FY-1C可见光红外扫描辐射计获

取的多通道合成图像,地物及梅雨锋云系的特征十分清晰,反映出仪器的水平达到了较高的水平。2002年5月15日又发射了后续卫星FY-1D,至今仍在轨运行。由于我国的气象卫星是从数字化定量观测起步的,起点较高,发展较快,在较短的时间内实现了业务化,为资料应用开辟了广阔的前景。

1.4 静止轨道气象卫星连续观测的实现

1974年5月,美国的静止轨道通信卫星ATS发射。其卫星平台有空余。美国威斯康辛大学Suomy教授提议装载气象传感器,于是诞生了静止气象卫星云图。静止气象卫星实现了昼夜24小时不间断的气象观测,对天气预报有重要意义。1975年11月,美国的静止气象卫星GOES-1实现业务运行。1977年7月,日本第一颗气象卫星发射,我国开始使用静止气象卫星资料。1978年,欧洲空间局的第二个模型卫星F2搭载了水汽通道的图像仪。水汽通道的图像对天气预报有重要意义。

由于极地轨道和静止轨道对于天气观测的互补优势,我国在气象卫星发展初期即提出了同时发展极轨和静止两个系列气象卫星的思路。风云二号静止气象卫星工程在20世纪80年代上马。1997年6月10日,我国第一颗静止气象卫星风云二号A星发射成功。2004年10月19日,风云二号C星成功发射并实现业务运行,后续D星和E星的连续发射,使得我国静止气象卫星业务很快进入稳定的业务化运行阶段。现在,我国广大气象台站的天气预报服务已经高度依赖于风云二号气象卫星的云图。图2是FY-2E水汽图像与云导风的叠合产品。静止卫星的高频次连续观测,使其可以通过追踪示踪云来获取大气风场信息。

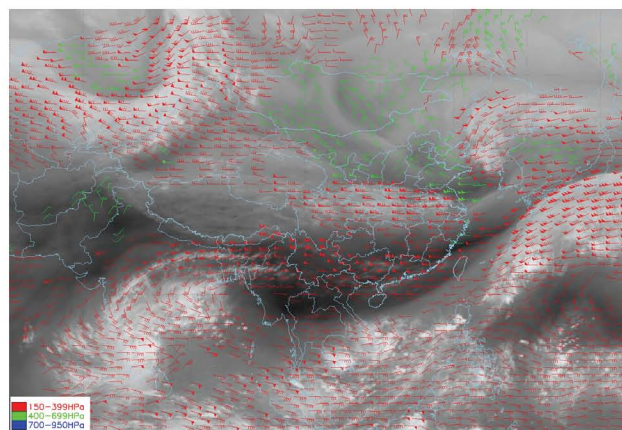


图2 FY-2E水汽图像与云导风的叠合(2010年11月07日19时30分,北京时间)

1.5 垂直探测带来的喜悦和失望,数据直接同化的诞生

1969年4月,美国Nimbus-3实验卫星的红外光谱仪(SIRS)获取了大气垂直探测资料,Wark等^[5]首次

成功地反演了温度廓线，使气象界十分惊喜。在随后的Nimbus-5上还搭载了第一台微波垂直探测仪器(NEMS)，具有了穿透浓密云层的垂直探测能力。从1978年的“泰罗斯-N”(TIROS-N)开始，上述仪器经过优化后成为红外垂直探测仪(HIRS)和微波探测仪(MSU)，并投入业务运行。所有工作通道均经过精心挑选，可以覆盖所有大气层高度。其中HIRS具有17千米的水平分辨率，MSU是109千米。将红外和微波仪器搭载到同一极轨卫星上能够每12小时覆盖全球一次，获得完整的温度和湿度廓线资料，资料的水平分辨率为250千米^[6]。

在卫星资料应用于数值天气预报的早期，人们很自然地试图使卫星测值与模式设计和使用的地球物理参数类似，如温度和湿度垂直廓线。但是卫星观测的是辐射量，需要经过反演才能得到大气温湿度廓线，这样就不可避免引入误差，同时，云的干扰也难以剔除。因此，卫星反演的温湿廓线资料进入数值预报模式后，并没有产生预期的正效果。用1980年代的最佳内插技术同化卫星资料对数值天气预报没有什么影响，甚至有负的影响。在1980年代后期，卫星反演资料在许多数值天气预报中心被列入黑名单。1989年，Eyre提出用变分同化方法在数值天气预报中直接使用辐射的方法，开创了卫星资料应用的新纪元。在1990年代，各种分析方案^[7]被许多数值天气预报中心引入数据同化系统中。到20世纪末，三维变分同化系统和卫星辐射资料的直接同化提高了卫星资料相对于探空资料的重要性。最近在欧洲中期天气预报中心(ECMWF)进行的观测系统实验已经清楚地证实，现在，来自卫星的信息在北半球和南半球对于数值天气预报都是全球观测系统中最重要贡献者。

1.6 被动微波遥感

基于微波探测仪(MSU)获取的资料，人们认识到被动微波遥感的巨大作用。1987年，美国国防卫星装载微波成像仪(SSM/I)，观测到云系的内部结构。1998年5月，NOAA-K卫星装载了先进的微波探测仪(AMSU)。AMSU微波探测提供的全球资料，在全球数值天气预报中获得了非常好的效果。用两颗卫星的AMSU资料与不用AMSU资料比，欧洲地区上空500hPa位势高度5天预报的技巧提高了一天。1992年4月，欧洲ERS-1卫星用单侧扫描微波散射计获得了海面风资料。ERS-1不久便失去工作能力。美国JPL看到洋面风对大气和海洋观测的巨大应用价值，迅速开发了QuikSCAT卫星，并于1999年6月将其业务化。

由于第一代风云极轨气象卫星只有成像仪器，难

以对数值天气预报提供强有力的支持。因此，我国在发展第二代极轨气象卫星风云三号时，将红外和被动微波垂直探测技术作为优先考虑的对象。2008年5月27日风云三号A星(FY-3A)发射成功。风云三号是我国自主研发的新一代极轨气象卫星，实现了全球、全天候定量遥感，可以对大气进行立体观测，具有全球250米分辨率地表、环境监测能力，对台风等灾害性天气进行红外、微波垂直探测和微波成像探测。FY-3A卫星作为我国新一代风云极轨气象卫星的首发试验卫星，具有有效载荷多、运动部件多的特点，且大部分仪器属于首次上星，仪器的定量探测性能要求高、技术复杂、研制难度大，整星研制水平与国际同类气象卫星相当。风云三号A星使我国极轨气象卫星的观测水平大大向前跃升，达到国际同类气象卫星水平^[8,9]。图3是FY-3B微波成像仪的亮温图像和降水反演产品，揭示了2011年02号热带气旋“桑达”的降水三维空间分布。

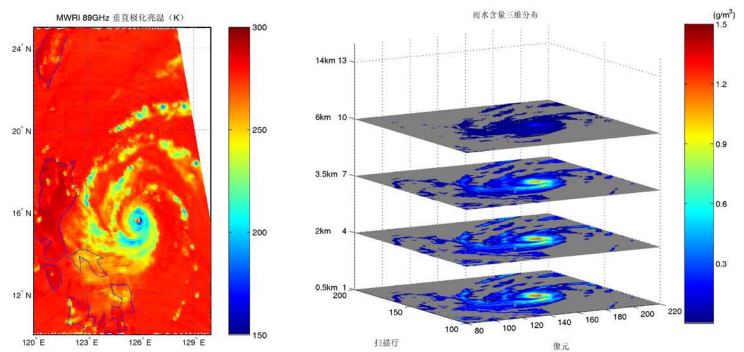


图3 左：FY-3B微波成像仪89GHz通道的亮温图像（2011年5月27日14时13分，北京时间）；右：FY-3B微波成像仪反演大气三维降水分布

1.7 三轴稳定静止气象卫星的高时相对地观测

1994年4月，美国三轴稳定静止气象卫星GOES-8发射成功，获得每分钟一幅的图像动画，看到了发展中强对流天气系统中的重力波，甚至龙卷风的卫星图像。过去的自旋稳定气象卫星每自旋一周才能获得一条扫描线，完成一次全圆观测需要30分钟左右。三轴稳定气象卫星可以凝视观测目标物，观测间隔从小时级提高到分钟级，不仅可以有效地高时相地进行局地云图观测，而且观测仪器在观测目标物上驻留时间更长了，有利于观测信噪比和定量精度的提高。三轴稳定姿态稳定方式是静止气象卫星的发展方向。

1.8 空间对地主动遥感

1997年11月，NASA-JAXA合作发射了热带降雨测量卫星TRMM，开始用主动降水雷达(PR)下视观测云中的降水结构。星载微波探测遥感降水，是能够提供比较均匀一致的全球降水资料的唯一手段。在

此前的气象卫星均采用被动微波遥感观测，TRMM开始了主动遥感观测，具有对三维云雨结构的穿透力，并获得了比被动手段更高的径向分辨率。它相当于把气象雷达放在太空自上而下观测云系内部水滴的状况，这对天气预报有重要意义。

1.9 无线电掩星大气探测

1999年1月，中国台湾与美国合作，发射了采用无线电掩星技术观测的GPS卫星星座（COSMIC）。GPS卫星的轨道高度为20000千米。它穿过地球大气看到其他低轨道卫星在地面上升起和落下。无线电波穿过大气的速度是大气密度的函数。因此在掩星期间GPS的信号传播路径的长度，由于大气状态参数垂直廓线的不同而随大气折射指数而变化。所引起的多普勒频率漂移，能用来计算每一条无线电波路径穿过大气时有代表性的大气折射指数的垂直廓线。正是通过折射指数的垂直廓线，可以计算出非常精确的温度和湿度垂直廓线，这个技术叫做掩星技术。COSMIC星座可以提供实时无线电掩星探测，可用于天气预报，也可作为气候研究的第一手资料。无线电掩星探测的主要优势是可以获得很高的垂直分辨率（500米），但是其水平分辨率相对较低（150~200千米）。另外，由于基本不受云和降水的影响，它具有全天候观测能力。

2 目前我国气象卫星与发达国家的比较

经过四十年的努力，我国依靠自己的力量建立了极轨、静止两个系列的气象卫星，实现了高度稳定可靠的业务运行、定量产品生成和广泛的数据共享，广泛开展气象卫星资料应用，取得了举世瞩目的成就。但是我国的气象卫星观测仪器，在通道灵敏度、信噪比以及大气探测光谱分辨率等方面与外国先进的卫星相比，总体尚有差距，其中风云三号中分辨率光谱成像仪、微波探测仪、臭氧探测仪等几个仪器的观测质量大致与欧美同类气象卫星相当。而我国的风云二号静止气象卫星，则与20世纪90年代国外的自旋卫星技术水平相当。

随着国力的增强和技术水平的提高，近年来，风云气象卫星的发展呈现加速追赶国际先进水平的态势。

2.1 极轨气象卫星的比较

2.1.1 发展的时间和发射数量对比

美国无疑是世界上发展气象卫星最早、发射气象卫星数量最多的国家。在试验阶段，发射的卫星多达35颗，而从1978年起的NOAA系列业务卫星，迄今已经发射了19颗。为了发展下一代气象卫星JPSS，美国由国家宇航局（NASA）研发了地球观测卫星

（EOS）系列。但由于经费原因，JPSS卫星研发进展缓慢，比原订计划大大推迟。

欧洲认识到极轨卫星资料在数值预报中的巨大作用，ECMWF数值模式中同化NOAA的TOVS资料，其效果和水平甚至超过美国，在经过长时间的论证后，决定发展极轨气象卫星METOP系列，起点很高，直接与美国JPSS卫星性能相兼容，第一颗于2007年发射成功，携带载荷较多，特别是高光谱红外垂直探测仪（IASI），具有上千个光谱通道，是目前世界上最先进的极轨气象卫星。

我国在成功发射4颗风云一号卫星后，迅速开展了第二代极轨气象卫星风云三号的研制工作。FY-3A卫星的成功发射和高质量运行，取得了巨大成功，令全球瞩目。FY-3B于2010年11月5日发射成功，与A星一起首次实现了上下午星组网观测。经过严格的检验，一些仪器的观测数据被证明具有良好的质量，陆续进入业务数值预报模式中使用。

2.1.2 技术性能

2.1.2.1 卫星平台技术体制

我国FY-3卫星平台，采用三轴稳定方式，技术与欧洲METOP和美国下一代极轨气象卫星NPP/JPSS接近，主要是设计寿命不同，国外卫星设计寿命一般为五年以上，我国FY-3在试验阶段为3年，业务阶段有望实现4~5年。

2.1.2.2 有效载荷

中国、美国、欧洲新一代极轨气象卫星首发星的有效载荷配置比较，见表1。

2.2 静止气象卫星的比较

2.2.1 发展的时间和卫星数量对比

美国第一颗业务静止气象卫星GOES-1于1975年

表1 中国、欧洲和美国新一代极轨气象卫星首发星的有效载荷配置

仪器 \ 卫星	中国 FY-3A	欧洲 METOP-A	美国 NPP
1.扫描辐射计	√	√	√
2.红外分光计	√	√	×
3.微波温度计	√	√	√
4.微波湿度计	√	√	√
5.中分辨率光谱成像仪	√	×	×
6.微波成像仪	√	×	√
7.紫外臭氧垂直探测仪	√	√	√
8.紫外臭氧总量探测仪	√	√	√
9.地球辐射探测仪	√	×	√
10.太阳辐射监测仪	√	×	√
11.空间环境监测仪	√	√	√
12.高光谱大气探测器	×	√	√
13.雷达散射计	×	√	×
14.雷达高度计	×	×	√
15.GPS大气掩星探测仪	×	√	√
16.大气偏振探测仪	×	×	√
17.大气温室气体探测仪	×	×	×
18.数据收集系统	×	√	√
19.搜索救援系统	×	√	√

√表示搭载；×表示不搭载。

10月发射，迄今已经历了三代。GOES-1至GOES-3为第一代，装载了可见光红外自旋扫描辐射器(VISSR)；GOES-4至GOES-7为第二代，卫星姿态控制仍为自旋稳定，装载了VISSR大气探测器(VAS)；1994年发射的GOES-8以后为第三代，卫星姿态控制改为三轴稳定，装载了成像仪和独立的大气垂直探测器。

欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)于1977年11月发射了第一颗静止气象卫星Meteosat-1、该系列卫星发射了7颗。第二代静止气象卫星中的第一颗MSG-1于2002年8月发射成功，2005年发射了MSG-2。

日本自1977年7月发射GMS卫星以来，总共发射5颗卫星。接替卫星MTSAT-1R于2005年3月发射成功并投入业务运行，日本吸取发展GMS卫星的经验和教训，为保证卫星的业务连续性，采取卫星在轨存储备份，随即发射了MTSAT-2R。

我国于1997年5月成功发射了第一颗静止气象卫星风云二号(FY-2A)，此后陆续发射成功了4颗卫星。从2004年FY-2C发射成功后真正进入业务。

表2给出不同国家静止气象卫星有关指标对比情况。

表2 各国发射静止卫星时间及数量对比

国家	第一颗卫星发射时间	进入业务时间	发射数量(颗)
中国	1997年5月	2004年	5
美国	1975年10月	1976年	13
欧洲	1977年11月	1978年	9
日本	1977年7月	1978年	7

2.2.2 技术性能

2.2.2.1 卫星平台技术体制及设计寿命

目前在轨运行的静止气象卫星，中国和欧洲的卫星采用自旋稳定姿态的技术体制，不足是对地观测效率低，探测灵敏度不高，无法实现大气垂直探测。美国和日本卫星采用三轴稳定姿态的技术体制。

美国、欧洲和日本的在轨静止气象卫星的设计寿命均为5年以上，我国风云二号静止气象卫星的设计寿命为4年。

美国采用东西双星业务运行，这要从系统设计、业务计划和发射安排上来进行保障。我国采用的是“双星观测，在轨备份”业务体制，确保天上至少有一颗卫星业务运行。

2.2.2.2 主要有效载荷

在轨业务运行的静止气象卫星携带的主要载荷是：多通道扫描成像仪、大气垂直探测器、空间环境监视器、太阳X射线成像仪和地球辐射收支仪等(见表3和表4)。

表3 各国静止卫星携带主要有效载荷对比辐射

项目	多通道扫描成像仪	大气垂直探测器	空间环境监视器	太阳X射线成像仪	地球辐射收支仪
中国	有	无	有	无	无
美国	有	有	有	有	有
欧洲	有	无	有	无	有
日本	有	无	有	无	无

表4 多通道扫描成像仪主要技术性能对比

波段带宽(μm)				星下点分辨率(km)			
欧洲MSG	美国GOES	日本MTSAT	中国FY-2	欧洲MSG	美国GOES	日本MTSAT	中国FY-2
0.40~1.10				1.00			
0.56~0.71	0.55~0.75	0.55~0.80	0.55~0.90	3.00	1.00	0.50	1.25
0.74~0.88				3.00			
1.50~1.78				3.00			
3.48~4.36	3.80~4.00	3.50~4.00	3.50~4.00	3.00	4.00	2.00	5.00
5.35~7.15				3.00			
6.85~7.85	6.50~7.00	6.50~7.00	6.30~7.60	3.00	4.00	2.00	5.00
8.30~9.10				3.00			
9.38~9.94				3.00			

2.3 气象卫星的未来发展

2.3.1 国际对地观测卫星发展趋势

目前，有许多国家和国际组织从事与气象有关的卫星对地观测工作。根据国际对地观测协调组织CEOS的不完全统计，目前已发射或列入计划的具有气象观测能力的代表性对地观测卫星有^[10]：

a) 美国NASA EOS下午卫星，用于大气动力学、能量和水分循环、云的形成、降水、无线电传输掩星、海气能量水汽交换、海冰伸展范围及其与大气的热交换。

b) 美国NASA ASCENDS使命，主动遥感二氧化碳总量和排放。

c) 美国NASA Glory使命，以足够的精度、时空范围和分辨力监测自然排放的和人为排放的气溶胶。

d) 美国NASA/NOAA的地球静止业务环境卫星GOES，主要任务是气象，还有搜索救援、空间环境监测、数据搜集和广播。

e) 美国NASA与法国CNES合作的CALIPSO使命，云和气溶胶的激光红外观测探路卫星，用三通道的激光和被动遥感仪器测量云和气溶胶的性质。

f) 美国NASA、日本JAXA全球降水测量卫星星座系列，主卫星有主动和被动微波观测仪，从卫星只有被动微波观测仪，研究全球降水、蒸发、水循环及其变化。

g) 欧空局ESA大气动力学使命，提供全球三度空间风场观测。

h) 日本JAXA温室气体观测卫星，观测温室气体。

以上观测计划中，大部分是研发卫星或科学试验卫星，采用了大量先进的遥感仪器和技术手段，提供了对地球物理和化学过程更为全面和精确的描述。这些计划实施后，对全球天气预报、气候预测、气候变

化监测与评价业务将产生重大的影响, 同时也将深刻影响未来气象卫星探测技术的发展。通过对以上卫星探测能力的分析, 未来地球观测卫星发展趋势可以概括描述为:

- 更加综合的全球地球系统观测, 包括大气、陆地和海洋观测;
- 采用被动和主动遥感手段的结合, 实现全天时、全天候、三维探测;
- 更加高的时空分辨率和光谱分辨率;
- 更加良好的仪器灵敏度和更为准确的仪器定标, 从而获得更加精确的地球辐射测量;
- 星座观测成为综合探测的主要方式。因此, 通过互定标使得卫星之间的观测具有一致性和可比性显得十分重要。

2.3.2 风云卫星未来发展计划

2.3.2.1 风云三号后续卫星

在FY-3A/B试验卫星后, 目前计划发射4颗风云三号业务卫星FY-3C/D/E/F, 分别于2012, 2014, 2016和2018年发射, 并保持上下午轨道的星座布局。风云三号业务卫星的主要考虑是: 继承试验卫星的成熟技术, 对遥感仪器进行优化完善, 并发展急需的探测能力, 包括:

- 改进全球成像观测能力;
- 发展紫外和红外高光谱大气探测仪;
- 改进微波温度湿度探测能力;
- 发展大气成分观测能力;
- 增加海面风场观测。

此外, 还计划发展风云三号降水测量卫星。表5为风云三号业务卫星有效载荷配置。

2.3.2.2 下一代静止气象卫星风云四号

下一代静止气象卫星风云四号(FY-4)将采用三轴稳定平台, 实现技术上的重大跨越。首发星FY-4A科学试验卫星计划于2015年发射, 并在完成试验任务后, 发射两颗业务卫星FY-4B和FY-4C。风云四号卫星将具备以下性能:

- 先进的成像观测能力, 更多的观测通道和更高的空间分辨率, 提供更为灵活的指向观测, 实现分钟级的区域连续观测;
- 首次采用傅立叶干涉式红外探测仪, 实现静止轨道高频次大气垂直探测;
- 首次实现星载闪电探测;
- 实现空间环境监测和极紫外和X射线太阳成像观测。

风云四号卫星将大幅度提高我国的静止气象卫星观测能力, 如期发射后, 将和同期美国新一代静止气象卫星GOES-R和欧洲的第三代静止气象卫星MTG处

于大体相当的技术水平。

表5 风云三号业务卫星有效载荷配置遥感仪器

遥感仪器	FY-3C	FY-3D	FY-3E	FY-3F
改进的中分辨率光谱成像仪(MERSI-II)	√	√	√	√
改进的微波温度计(MWTS-II)	√	√	√	√
改进的微波湿度计(MWHS-II)	√	√	√	√
微波辐射成像仪(MWRI)	√	√	×	√
高光谱红外大气探测仪(HIRAS)	×	√	√	√
海面风场测量雷达(SWMR)	×	×	×	√
GPS掩星探测仪(GNOS)	√	√	√	√
大气温室气体吸收光谱仪(GGAS)	×	×	×	×
地球辐射测量仪(ERM)	√	×	√	×
太阳辐射监测仪(SIM)	√	×	√	×
空间环境监测仪(SES)	√	√	√	√
红外大气垂直探测仪(IRAS)	√	×	×	×
可见光红外扫描辐射计(VIRR)	√	×	×	×
太阳后向散射紫外探测仪(SBUS)	√	×	×	×
臭氧总量探测仪(TOU)	√	×	×	×

√表示搭载; ×表示不搭载。

3 风云气象卫星的应用

实践表明, 气象卫星探测与其他观测相比较, 有许多优点。气象卫星在离地球几百千米和几万千米的宇宙空间对地球大气进行观测, 可以不受国界和地理条件的限制实现全球的观测。气象卫星观测可以得到每日的可见光、红外和水汽等多波段图像资料、大气垂直探测资料、微波探测资料、太阳质子和粒子资料。观测的资料不仅有定性观测资料、还有定量观测资料, 并且可以实现长期连续观测。采用多个光谱段, 以短的时间间隔测量, 能及时掌握云系演变和各种气象要素, 为天气预报提供重要依据。气象卫星遥感还可以实现许多常规探测无法进行的观测, 如: 辐射、云、气溶胶、大气成分、陆面状况(土壤湿度、植被)、海冰、大地水准面高度、海面风、海表水温等。这些要素的获取, 在地球和空间环境监测、气候变化的预测、天气预报准确率的提高、灾害性天气系统的监测方面发挥着重要的作用。气象卫星采用遥感探测的方法获取目标物的物理特性。气象卫星探测具有观测速度快、项目多、信息量大, 测量系统不干扰被观测目标物, 资料代表性、一致性、连续性、可比性好的优点。能更好地反映观测对象的动态变化。从气象卫星获取的大气和地表信息, 已被广泛应用于天气预报、气候预测、环境和自然灾害监测、农业等多个领域, 为国家经济发展、社会进步作出了贡献^[11-15]。

3.1 气象卫星在天气和气候中的应用

风云系列气象卫星投入业务运行后, 为台风、暴雨、冰雹、暴雪、沙尘暴、龙卷风等灾害性天气的监测提供了更有力手段, 为短期气候预测提供了更多有用的参数, 如海表水温、雪盖、植被指数等, 为改善天气预报和短期气候预测作出了贡献。

3.1.1 云图在天气预报中的作用

目前我国使用两颗静止气象卫星风云二号D星和

E星组成双星业务系统,对我国和周边地区的天气系统进行了有效地监视。每年的9月至第二年5月的非汛期,运行“非汛期观测模式”,“主业务星”每小时的正点开始观测,“备份业务星”每小时的半点开始观测,每颗卫星每天获取28幅全圆盘图,两颗卫星的共同观测区域每天可以进行48次观测。每年的6月至8月的汛期,运行“汛期观测模式”,“主业务星”每小时的正点开始全圆盘图观测,每小时的半点开始北半球图观测,每颗卫星每天共获取28幅全圆盘图、20幅北半球图,两颗卫星的共同观测区域每天可以进行96次观测,即每十五分钟获取一幅云图。每十五分钟一幅的原始分辨率云图组成动画,大大提高了对中小尺度天气系统的监视能力,也有利于预报人员和公众认识天气系统。

3.1.2 台风监测

台风是一种灾害性天气系统。1970年代以前,全球范围内单个台风造成10万以上人死亡的个例共发生过7次,其中有1次发生在中国和越南。台风还是一种热带天气系统,在浩瀚的洋面上生成和发展。海洋上雷达和地面观测资料非常稀少。“自从有了气象卫星,影响和登录我国的台风无一漏网”。风云气象卫星已成为台风观测最主要的手段。云图和其他气象卫星定量观测资料用于分析和预报台风的位置、强度和天气,做到了一个不漏,大大减小了台风所造成的损失。

3.1.3 中小尺度天气系统监测

对于在陆地上产生的暴雨和大风、冰雹等中尺度灾害性天气的监测和预报,卫星云图发挥着十分重要的作用。陆地上许多致灾剧烈天气,是由中尺度天气系统造成的。中尺度天气系统生命期只有几小时,活动范围只有几百千米。现在,风云二号静止气象卫星在汛期每半个小时观测一次云图,云图的分辨率达到可见光1.25千米、红外5千米。云图上的云及其演变和分布,代表着大气中正在进行着的动力和热力过程。用动画观看,重要中尺度天气的起源、运动、发展能够被观测到。中尺度系统的触发,需要特定的大气三度空间结构和下垫面不均匀加热条件。云图动画在与中尺度系统触发机制大小相当的时间和空间分辨率上,观测到了对流系统,这为中尺度天气系统的即时预报提供了依据。

3.1.4 气象卫星资料在资料稀少地区的气象预报中的应用

我国西部,尤其是青藏高原的气象观测站极其稀少,长期以来人们很难获得全面系统的认识。我国的风云一号、风云二号气象卫星资料不仅揭示出来自印度洋涌上高原的热带云系的发生、发展和演变,以及

影响我国西南直至东部地区天气系统,最重要的是,卫星探测资料填补了我国青藏高原地区气象观测资料的空白。

极轨卫星资料对极地和高纬度地区天气的研究显得十分重要。极地涡旋不断向中纬地区输送冷空气,从而影响中纬度地区天气活动。过去由于极地常规资料非常稀少,而限制了对极涡的观测和研究,卫星云图可以非常直观地看到极涡云系分布,极涡的减弱和增强以及极涡的演变,可以监测和研究极涡及其对中纬度天气的影响。

3.1.5 卫星资料在短期气候预测中的应用

气象卫星资料在气候分析和预测中也发挥了重要作用。我国大范围降水和温度的异常分布与厄尔尼诺、拉尼娜事件为代表的太平洋海表水温异常,陆地上的植被分布、极地和青藏高原上的积雪分布等大范围陆地表面状态异常有关系。气象卫星提供了这些大范围海洋和陆地表面状态异常的信息,为短期气候预测提供了依据。

3.1.6 卫星资料在数值天气预报中的应用

高质量数值天气预报的关键是它的观测基础。现在,卫星资料已经成为全球数值天气预报所依赖的最重要的观测系统:一方面,大量高质量资料的卫星资料目前可以在全球范围内作为日常业务可靠地获得。其中有许多资料是通过国际合作由外国的气象卫星提供的,风云气象卫星也向外国同行提供我国的观测资料。另一方面,过去20年以来的研究工作已经大大改善了卫星资料和数值天气预报模式耦合的方式。

目前,中国气象局正大力开展卫星资料在数值预报中的应用研究,这是提高天气预报准确率的重要手段,将卫星探测资料加入到数值预报的三维同化系统中,能显著提高数值天气预报的精度和时效。风云二号卫星的一些产品,如卫星导风、水汽晴空辐射等,经过同化试验后表明有显著的应用潜力,风云三号卫星大气探测仪器资料,是数值预报模式直接辐射同化的重要资料源,已陆续应用到业务模式中。

3.2 气象卫星资料在环境和自然灾害监测中的应用

我国是环境和自然灾害种类较多、发生频繁的国家之一,风云系列气象卫星在洪涝、森林草原火情、沙尘暴、雪灾和海冰等监测中发挥了重要作用。

3.2.1 洪涝监测

用气象卫星观测数据可以清晰地区分地面上的水体和陆地,与背景资料比较,可以监测洪涝。在洪涝灾害发生期间,利用风云卫星资料,向国务院、水利部、国家遥感中心和有关省局提供了大量气象卫星洪

涝监测产品,其中包括洪涝地区逐县水体增量百分比排队,为灾害评估提供了客观依据。风云卫星还观测到引黄灌溉水体的范围,为水利部门管理黄河水资源提供了客观依据。

3.2.2 森林草原火情监测

卫星观测火情主要利用3.55~3.90微米的红外热辐射通道。这个通道对地物热辐射特别敏感,因此可以感知地面上高温热点的存在。利用气象卫星资料监测全国范围的火情,可以生成反映火灾位置、面积等的火情监测产品和信息,并及时传报国务院,传送到林业部防火办、农业部草原防火指挥部及森林武警等单位。风云卫星在重要火情监测中均发挥了重要作用。极轨卫星的观测通道多,分辨率高,静止卫星虽然分辨率略低,但每个小时都可以获得资料,为林火的实时监测作出了贡献。利用多年积累的火情发生数据,还可以揭示火险随季节和地区发生的风险等级,为有关部门科学防范火灾提供决策依据。

3.2.3 沙尘暴监测

我国地处欧亚大陆东部。每年春天,我国北方都会不同程度地受到沙尘天气的影响。由于沙尘的起源和发生地通常是常规气象观测比较薄弱的地区,因而气象卫星成为监测沙尘的最有力工具。利用风云静止卫星资料,可以动态监测沙尘的起源、移动路径以及发生发展过程;利用风云极轨卫星资料,可以定量反演大气中悬浮沙尘的光学厚度以及载沙量等。

3.2.4 积雪覆盖监测

积雪和云在可见光通道上对太阳辐射有强的反照率,在红外通道上则表现为低的热辐射光度温度,因此易于与其他地物特征相区别,在几天时间内,云的变化甚大,积雪则少变,据此又可把积雪与云相区别。风云一号和风云三号都具有特定的光谱通道,能有效地区分积雪和云。风云三号微波成像仪还具有反演雪深和雪水当量的能力。在我国发生雪灾期间,利用风云卫星资料制作的积雪覆盖图像成为救灾决策的重要科学依据。另外,通过统计积雪持续日数监测图,反映了积雪覆盖在地面的持续时间和覆盖范围,这是评估雪灾和进行气候预测的重要信息。

3.2.5 海冰监测

风云一号卫星对云、海冰的结构观测比较精细,在各波段都有不同的反映,利用它可以生成多通道海冰监测图像、冰面积及冰覆盖度分析图、海冰和海水表面亮度温度等值线图。风云三号的中分辨率光谱成像仪,进一步改进了海冰的监测能力。多年来,通过提供海冰监测产品服务,风云卫星资料为海上运输和石油生产安全保障作出了贡献。

3.3 气象卫星资料在农业方面的应用

3.3.1 植被监测

叶绿素对0.55~0.68微米的可见光太阳辐射有吸收作用,而对0.725~1.10微米的近红外太阳辐射有极强的反射能力,利用植物的这种性质,对以上两个通道的辐射值进行适当组合,可以计算出归一化的植被指数。利用积累多年的全国植被指数资料生成旬植被指数距平图,对重大干旱发生时农作物受影响情况有比较明显的反映。另外,气象卫星遥感植被信息和地面观测资料的综合还可以用于农作物估产,已在气象卫星遥感冬小麦估产中得到了成功应用。

3.3.2 干旱监测

干旱是我国最严重的自然灾害。土壤湿度即干旱程度目前尚不能通过卫星遥感直接观测,但利用含水率高的土壤热容量大这一性质,通过观测昼夜地表温度,可以粗略估计土壤湿度状况。利用气象卫星资料采用遥感方法可获得客观的全国范围的干旱分布图。近年来,我国频繁发生大范围持续干旱,利用风云卫星获得的植被绿度指数图和地表温度图,有效地反映了干旱及对农作物生长的影响。

参考文献

- [1] Rao P K, Holmes S J, Anderson P K, et al. 气象卫星—系统、资料及其在环境中的应用. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] 许健民, 纽寅生, 董超华, 张文健, 杨军. 风云气象卫星的地面应用系统. 中国工程科学, 2006, 8(11): 13-18.
- [3] Dvorak V F. A technique for the analysis and forecasting of tropical cyclone intensities from satellite pictures. NOAA TM, NES 36, Washington, D.C.: NOAA, NES, U.S. Dept. of Commerce. 1972.
- [4] 方宗义, 许健民, 赵凤生. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展. 气象学报, 2004, 62(5): 550-560.
- [5] Wark D Q, Hilleary D T, Anderson S P, Fischer J C. NIMBUS satellite infrared spectrometer experiments. IEEE Trans. Geosci. Electron., 1970, GE-8: 264-270.
- [6] Smith W L, Nagle F W, Hayden C M, Woolf H M. Vertical Mass and Moisture Structure from TIROS-N. Bull. Amer. Met. Soc., 1981, 62: 388-393.
- [7] Eyre J R. Inversion of cloudy TOVS radiances by non-linear optimal estimation. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1989, 115: 1001-1037.
- [8] 杨军, 董超华, 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.
- [9] Dong Chao-hua, Yang Jun, Coauthors. An Overview of a New Chinese Weather Satellite FY-3A. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2009, 90: 1531-1544.
- [10] CEOS Missions, Instruments and Measurements database online, <http://www.ceos.com/>
- [11] 杨军, 董超华, 等. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] Weldon R B, Holmes S J. 水汽图像在天气分析和天气预报中的解释与应用. 北京: 气象出版社, 1994.
- [13] Dvorak V F, Smigielski. 卫星观测的热带云和云系. 北京: 气象出版社, 1996.
- [14] Bader M J, Forbes G S, Grant J R, et al. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] Santurette P, Georgiev C G. 卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析预报中的应用. 北京: 科学出版社, 2008.

(下转24页)

- IEEE Trans Geos Remote Sens, 2007, 45: 2228-2246.
- [15] Deblonde G, English S J. Evaluation of the FASTEM-2 fast microwave oceanic surface emissivity model, Tech. Proc. ITSCXI Budapest, 2026 Sept 2000, 2001: 67-78.
- [16] Weng F, Grody N C. Retrieval of liquid and ice water content in atmosphere using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I). Microwave Radiometer and Remote Sensing of Environment. X. Solminili, Ed., 1994, VSP: 281-295.
- [17] Ferraro R R. SSM/I derived global rainfall estimates for climatological applications. J. Geophys. Res., 1997, 102(16): 715-16, 735.
- [18] Weng F, Grody N C. Physical retrieval of land surface temperature using the special sensor microwave imager. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1998, 103: 8839-8848.
- [19] Sun N, Weng F. Evaluation of Special Sensor Microwave Imager and Sounder (SSMIS) Environmental Data Record. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 2008, 46: 1006-1016.
- [20] Weng F, Grody N C. Retrieval of ice cloud parameters using a microwave imaging radiometer. J. Atmos., Sci., 2000, 57: 1069-1081.
- [21] Zhao L, Weng F. Retrieval of ice cloud parameters using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). J. Appl. Meteorol., 2002, 41: 384-395.
- [22] Weng F, Han Y, van Delst P, Liu Q, Yan B. JCSDA Community radiative transfer model (CRTM). Technical Proceedings of Fourteenth International ATOVS Study Conference, Beijing, 2005.
- [23] Han Y, Weng F, Liu Q, van Delst. A fast radiative transfer model for SSMIS upper-air sounding channels. J. Geophys. Res., 2007, 112, D11121. doi: 10.1029/2006JD008208.
- [24] Stogryn A. The magnetic field dependence of brightness temperature at frequencies near the O₂ microwave absorption lines. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 1989, 27: 279-289.
- [25] Rosenkranz P, Tewarson N C, Singh A, Engels W. Differential hygienic behavior towards Varroa jacobsoni in capped worker brood of Apis cerana depends on alien scent adhering to the mites. J. Apic. Res. 1993, 32: 89-93.
- [26] Lenoir W B. Propagation of partially polarized wave in a slightly anisotropic medium. J. Appl. Phys., 1967, 38: 5283-5290.
- [27] Lenoir W B. Microwave spectrum of molecular oxygen in the mesosphere. J. Geophys. Res., 1968, 73: 361-376.
- [28] Rosenkranz P W, Staelin D H. Polarized thermal microwave emission from oxygen in the mesosphere. Radio Science, 1988, 23: 721-729.
- [29] Derber J, Wu W-S. The use of TOVS cloudcleared radiances in the NCEP SSI analysis system. Mon. Wea. Rev., 1998, 126: 2287-2299.
- [30] Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation data set. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 78: 5-20.
- [31] Robinson J, Isidore M, Marguerite M A, Öhman M C, Payet R J. Spatial and temporal distribution of reef fish spawning aggregations in the Seychelles – An interview based survey of artisanal fishers. Western Indian Ocean J. Mar. Sci., 2004, 3: 63-69.

卫星专用传感器微波成像仪/探测仪 (SSMIS) 观测资料在天气和气候研究中的应用

Weng F^{1,2}, Zou X^{3,4}, Yan B², Han Y^{1,2}, Liu Q^{2,5}

(1 美国国家海洋和大气管理局/国家环境卫星、数据与信息服务部/卫星应用与研究中心, 美国 2 卫星数据同化中心, 美国 3 南京信息工程大学数据同化研究与应用中心, 南京, 中国 4 佛罗里达州立大学, 地球海洋大气科学系, 美国 5 IMIS公司, 美国)

摘要: 2003年10月18日, 美国国防气象卫星计划成功发射搭载了专用传感器微波成像仪/探测仪的F-16卫星。然而由于天线自身热辐射和校准暖黑体的不稳定, 第一个专用传感器微波成像仪/探测仪出现了一些重要的异常观测。美国海军实验室与美国国家海洋和大气管理局(NOAA)分别开发了两种算法来订正这些异常值。剔除了定标异常值后, 专用传感器微波成像仪/探测仪资料目前在探空数据产品反演和资料同化中发挥了更加显著的作用。NOAA利用专用传感器微波成像仪已有算法生成了专用传感器微波成像仪/探测仪成像仪产品。此外, 一些新开发的算法可以从专用传感器微波成像仪/探测仪资料中提取出云和降水的信息。在云冰云水的反演算法中, 亮温是与云冰云水路径和粒子的平均直径相关的。利用一维变分反演系统, 同时反演出了多数大气和地表条件下的大气温度、湿度以及水凝物的垂直廓线。在各种天气形势下, 由专用传感器微波成像仪/探测仪资料反演得到的温度和湿度廓线的均方根误差通常分别小于2K和15%。为了同化专用传感器微波成像仪/探测仪资料, 还发展了新的质量控制和偏差订正方法。在NOAA的全球预报系统中同化了专用传感器微波成像仪/探测仪资料后, 对提高全球中期数值预报水平产生了中性和较小的正效果。

(上接13页)

40th Anniversary of Fengyun Meteorological Satellites: Evolution in View of the International Development

Yang Jun, Xu Jianmin, Dong Chaohua

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

Abstract: With 40 years' huge efforts, China has successfully developed both polar and geostationary meteorological satellite series, and put them into operational use. This article reviews the significant historical events along with the stages of meteorological satellite development in the world, outlines the development of Chinese Fengyun meteorological satellites in the scope of international views, and compares Fengyun's technical level with that in advanced countries. In addition, it briefly introduces the applications of meteorological satellite data in weather, climate, natural disasters and environmental monitoring, and in the agriculture service.