

李俊,方宗义. 卫星气象的发展——机遇与挑战[J]. 气象,2012,38(2):129-146.

卫星气象的发展——机遇与挑战^{*}

李 俊^{1,2} 方宗义¹

1 国家卫星气象中心,北京 100081

2 美国威斯康星大学

提 要: 气象卫星和卫星气象发展到今天,正处于一个承上启下,继往开来的关键时期。本文从国内外气象卫星的发展,气象卫星对大气科学的作用和影响这两大方面讨论了它们在不同发展阶段所取得的进展、成就和特点,以及未来的发展趋势和面临的科学、技术问题。在此基础上,提出了卫星气象为适应良好的发展机遇所面临的挑战,它们是:绝对辐射定标和真实性检验、发展快速精确的辐射传输模式、全球模式中同化卫星遥感的水汽和云等资料、在区域模式中同化卫星遥感的高分辨率资料和发展先进的反演算法。

关键词: 气象卫星, 卫星气象, 机遇, 挑战

The Development of Satellite Meteorology ——Challenges and Opportunities

LI Jun^{1,2} FANG Zongyi¹

1 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

2 University of Wisconsin-Madison, Madison WI, USA

Abstract: Meteorological satellites and satellite meteorology have been developed into a new era today, this paper overviews the role and impact of meteorological satellites in atmospheric sciences in different stages, as well as the challenges in science and technology to weather satellite programs. The science challenges include improving radiometric calibration and validation, developing fast and accurate radiative transfer models, assimilating atmospheric water vapor and cloud information from satellite measurements in numerical weather prediction (NWP) models and developing the advanced retrieval methodologies.

Key words: meteorological satellite, satellite meteorology, opportunity, challenge

引 言

自1960年4月1日世界上首次成功发射气象卫星以来,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、生态和环境保护、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。

回顾气象卫星的发展过程和未来趋势,明确卫星气象的发展机遇,迎接由此带来的挑战,乘势而上,可以更好地促进我国的气象卫星和卫星气象的发展。本文拟从国内外气象卫星的发展和特点,气象卫星对大气科学的影响和作用、卫星气象面临的机遇和挑战等三个方面来讨论这一问题。这是一个涉及空间技术、遥感技术和大气科学等多学科交叉的问题,受知识、学科和涉及面等的限制,文中会有不够准确、全面,甚至不当之处,敬请读者指正。撰写本文的目的在于引起大家对卫星气象未来发展

* 国家自然科学基金(40905056)资助

2011年8月9日收稿;2011年11月14日收修定稿

第一作者:李俊,主要从事气象卫星遥感探测原理和遥感探测资料处理方法研究。Email:jun.li@ssec.wisc.edu

的关注和思考。

1 国内外气象卫星的发展

1.1 国外气象和环境卫星的发展

1.1.1 极轨气象卫星的历史演变

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),首次获得显示大尺度天气系统特征的完整的卫星云图。从此业务气象卫星计划蓬勃发展。截止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。以下是泰罗斯计划中的一些关键步骤:(1)“泰罗斯”-8配备有自动图片传送系统(APT),世界各地的接收站只需一台简单的地面自动图片接收系统就能接收到实时的卫星图像。APT因而被誉为美国最伟大的“亲善大使”之一;(2)“泰罗斯”-9开始采用飞轮控制卫星姿态,使用该方式采集电视图像的时候照相机能正对星下点,从而简化了图像的定位问题;以及(3)引入太阳同步轨道,意味着卫星每次都能在相同的本地时刻穿越赤道,这样有利于绘制全球卫星拼图,同时也为一些重大的科学计划提供了便利条件,其中包括世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)。

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,环境勘测卫星)-1到“艾萨”-9,由环境科学服务局(即后来的NESDIS)负责。同时美国宇航局(NASA)还研发了一系列“雨云”(NIMBUS)实验卫星,发展该系列的主要目的之一是作为未来业务极轨卫星技术的测试平台,利用该系列卫星成功测试了一些先进技术(例如,三轴稳定的姿态控制、先进光电摄影系统、红外成像仪、微波辐射计和红外廓线仪)。Allison等^[1]详细阐述了“雨云”仪器对极轨卫星业务的影响。“雨云”还实现了很多科学上的突破,为卫星资料在地球科学领域中的应用奠定了基础。Hass等^[2]全面总结了“雨云”在气象、海洋、水文、地质、地貌、地理、地图以及农业上的贡献,同时认为“陆地卫星”计划也可直接追溯到“雨云”计划。

“雨云”系列卫星是全球天气试验项目的先驱。

全球天气试验是空间以及大气研究委员会(COSPAR)组织的一个大型项目。在首次全球大气研究计划全球试验以及随后的国际执行系统中,COSPAR第六工作组的评议和出版工作不仅为该项目的卫星观测系统部分制定了大方向,也为众多技术细节奠定了基础。

“艾萨”系列相对于“泰罗斯”系列有明显改进,包括在奇数号星上使用星载记录系统进行例行的全球观测资料的存储,在偶数号星上装备自动图片传送系统。紧接“艾萨”的是改进的“托斯”(艾托斯,ITOS),该系列将全球存储和自动图片传送系统集成到一颗卫星上。1970年1月发射的“艾托斯”-1是该系列首星,也是第一颗采用三轴稳定姿态控制方式的业务卫星。采用三轴稳定方式使得扫描辐射计能够稳定地在气象卫星上作业,从而昼夜提供红外窗区图像。1972年10月15日发射的“诺阿”-2卫星(NOAA-2)对云图的业务应用意义重大:它标志着光电摄像时代的结束以及多通道高分辨率扫描辐射计时代的开始。电视摄像时代从此让位于扫描辐射计,不过早期只能通过甚高分辨率辐射计(VHRR)获得可见光及红外窗区资料。接下来的一次改进是在1978年10月,伴随着“泰罗斯”-N(TIROS-N)卫星的发射开始的。“泰罗斯”-N的成像系统是一部四通道先进甚高分辨率扫描辐射计(AVHRR)。其后,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 km。以下通道是该成像系统的主要部分:(a) 0.58~0.68 μm ; (b) 0.72~1.1 μm ; (c) 3.55~3.93 μm ; (d) 10.3~11.3 μm ; (e) 11.5~12.5 μm 。

在1964年成功地获得地表及大气的全球图像后,工作重点转移到测量大气的温湿廓线上,以便为全球数值预报模式提供更好的初始场。King^[3]和Kaplan^[4]提出可以反演温度廓线与吸收气体在不同气压层的分布。King证明沿着多个角度侧向扫描大气能够获得温度随高度的变化(扫角法)。Kaplan则建议选一些特定的窄波段进行测量,并反演辐射传输过程(频谱法)。温度廓线可以通过大气中二氧化碳的吸收/发射来获取,湿度廓线则可以根据水汽的发射特征来反演。地表温度则可以利用窗区观测资料来估计,因为此波段大气几乎是透明的。Wark等^[5]提出了详细的卫星反演大气廓线的方法。

气象卫星观测利用的是从大气层上行的电磁辐射。地表往上的出射辐射随着波长变化,原因有二:

(1) 普朗克函数跟波长有关;(2) 大气中气体的吸收随分子结构不同而变化(CO_2 , H_2O , O_3 , ...)。利用这些对吸收气体敏感的波段便可以获得大气廓线结构。如果采样区域位于吸收波段的中心,则获得大气层上部的辐射(下部的辐射已被大气中的吸收气体吸收掉);如果采样区域逐渐离开吸收波段中心,则可连续获得大气下层的辐射信息。完全离开吸收波段则进入窗区,可以获得大气层最底部的信息。1969年用红外干涉光谱仪(IRIS),在 $11\ \mu\text{m}$ 的窗区测到320 K的地表温度,在 $15\ \mu\text{m}$ 的吸收波段测到210 K的对流层发射辐射。随着光谱移向二氧化碳吸收波段的中心,意味着发射辐射主要来自温度较低的上层大气,辐射温度因此也随着大气温度的降低而降低。

如果围绕一个吸收波段精心挑选合适的光谱,利用多波段观测就能获得温湿度垂直廓线。廓线反演基于如下一个事实:辐射在大气中的吸收和传输高度依赖于该辐射的频率和吸收气体的含量。如果工作频率离吸收波段的中心很近,少量的吸收气体就能吸收大量的辐射,因此多数出射辐射均来自大气的上层。如果工作频率离吸收波段的中心很远,就需要相对多量的吸收气体来吸收辐射;因此出射辐射来自低层大气。但是实际上推导温度廓线并不简单,因为接收到的上行辐射来自于相当厚的一层大气(约10 km)。此外,相邻波段的辐射在很大范围内是重合的。这就导致观测到的辐射记录不独立,进而导致反演结果不唯一。因此需要引入变分分析和其他辅助数据来求解。

使用1969年“雨云”-3号搭载的卫星红外光谱仪(SIRS),Wark等^[6]首次成功地反演出了温度廓线。与无线电探空仪结果比较发现,反演出的温度廓线整体效果不错,但是缺少垂直方向上的一些细节。由于视场直径有250 km,早期SIRS反演的主要问题是云的干扰。同时,由于SIRS只能观察轨道正下方区域,因而在多条轨道之间有大量空白区域。尽管有上述问题,SIRS资料还是给天气分析和预报带来很大希望。在卫星发射一个月后的1969年5月24日,SIRS的资料随即投入业务应用^[7]。“雨云”-3上还有红外干涉光谱仪(IRIS),这是一台能测量地球发射辐射的高光谱分辨率($5\ \text{cm}^{-1}$)迈克尔逊干涉仪。

早在1972年就有人提出一些减少云干扰的方案,包括提高空间分辨率(30 km)和水平方向连续扫描。

这些方案在“雨云”-5号上得以实现。该卫星上有一台作穿轨迹扫描的7通道红外温度廓线辐射计(IT-PR)^[8],并采用一种比较相邻视场辐射的方法来剔除云的干扰。该方案假定云量是导致两个相邻视场辐射变化的唯一原因。ITPR方案成功减轻了云量对天气尺度探测的影响,在95%的地球表面实现了垂直探测,相邻轨道平均间距250海里(1海里=1.852 km)。

“雨云”-5还搭载了第一台微波垂直探空设备NIMBUS实验微波光谱仪(NEMS),该仪器有5个通道并作天底扫描^[9]。NEMS具有穿透浓密云层的垂直探测能力。人们对ITPR,NEMS以及无线电探空仪资料进行了深入的比较和分析。结果显示,如果不考虑云的影响,将红外和微波资料作联合分析能获得最佳的温度反演效果^[10]。

根据20世纪70年代早期的分析,人们发现利用 $4.3\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$ 和 $0.5\ \text{cm}$ 三个吸收波段可以获得最优的温度廓线反演。随即在“雨云”-6上试验了高分辨率红外辐射探测仪(HIRS),该仪器覆盖 4.3 和 $15\ \mu\text{m}$ 两个红外吸收区,同时还搭载了扫描微波光谱仪用以获得 $0.5\ \text{cm}$ 波段的信息(SCAMS)。HIRS还使用了被动冷却探头技术,实现了完全的穿轨迹扫描,SCAMS也具有同样能力,只是水平分辨率稍低。HIRS试验的成功表明,利用 $4.3\ \mu\text{m}$ 观测资料具有改进获取对流层下部廓线信息的能力。

从1978年的“泰罗斯”-N(TIROS-N)开始,上述仪器投入业务运行。TIROS-N搭载有HIRS和微波探测装置(MSU)。所有工作通道均经过精心挑选,可以覆盖所有大气层高度。其中红外探空仪具有30 km的水平分辨率,微波探空仪是150 km^[11]。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1次,获得完整的温、湿度廓线资料,资料的水平分辨率为250 km^[12]。与无线电探空资料相比,TIROS晴空区域温度廓线的总体差别约为 $1.5\ ^\circ\text{C}$;有云区域约为 $2.5\ ^\circ\text{C}$ 。应该指出,这些差别不能简单地归结为误差,其中还包括了两种观测手段时空匹配不完全一致导致的差别,另外大气的扰动也能导致同样明显的差别。

由于增加了下述仪器,TIROS-N系列卫星演化为NOAA先进的“泰罗斯”-N系列卫星:(1)5通道AVHRR,用来观测云层和天气系统,反演海面温度^[13],探测城市热岛^[14]和火灾^[15],以及估算植被指数^[16];(2)改进的HIRS(HIRS/2),用来反演全球

温湿廓线^[17]; (3) 低水平分辨率 MSU, 反演云区的温度廓线; (4) 资料收集系统; 以及(5)搜索与营救(SAR)仪器。

当前的 NOAA 极轨卫星携带改进的 AVHRR (增加了一个 $1.6 \mu\text{m}$ 通道用来区分云和冰雪) 和 HIRS(还是继续它的基本使命) 以及两个先进的 MSU (AMSU) (以 50 km 水平分辨率提供温度廓线探测能力、以 15 km 水平分辨率提供湿度廓线探测能力)。1998 年 5 月实现的上述改进, 提供了更强大的微波廓线仪 (更多通道、更好的水平分辨率), 延续了原先的高水平分辨率红外廓线仪 (良好的水平分辨率、更高的光谱分辨率), 提供了全天候垂直廓线反演能力。

到 2011 年底, AVHRR 会被更先进的可见光红外成像辐射组件 (VIIRS) 代替, NOAA 系列也将更名为 JPSS 系列。VIIRS 要比 AVHRR 标定得更好, 具有更高的水平分辨率 (星下点: 400 m vs. 1 km), 并增加了 22 个通道。VIIRS 能给业务和气候研究提供的资料包括: 海面温度、气溶胶、雪盖、云盖、地面反射率、植被指数、海冰和海洋水色。HIRS 将被过轨扫描干涉型大气探测器 (CrIS) 替代。CrIS 是一台麦克尔逊干涉仪, 用来反演大气温、湿度廓线, 温度反演的目标精度为对流层内每千米大气层 1 K , 湿度反演的目标精度为每 2 km 15% 。为了达到上述精度, CrIS 必须跟先进技术微波廓线仪 (ATMS) 联合使用, ATMS 准备用来替代 AMSU, 在下一代卫星上作穿轨迹扫描。欧洲的 METOP 系列卫星也将有类似的探测能力, METOP 搭载了红外大气探测干涉仪 (IASI) 和 AMSU-A 以及微波湿度廓线仪 (MHS/HSB)。CrIS/ATMS 组合将工作在下午轨道 (13:30 上升轨道), IASI/AMSU/MHS 将工作在上午轨道 (09:30 下降轨道)。

1.1.2 地球同步卫星计划

在气象业务应用中有两类卫星, 一类是极轨的太阳同步轨道卫星, 轨道高度在 600 到 1600 km 之间, 对同一地点观测时间间隔为 12 小时, 另一类是位于赤道上空 35800 km 的地球同步卫星, 可以连续监测卫星视场范围内的天气变化。

1966 年 12 月 6 日, 第一颗应用技术卫星 (ATS-1) 发射升空。ATS-1 携带的自旋扫描摄影机 (SSCC)^[18] 每 20 分钟能够提供一张全景可见光云图。将 SSCC 送到 ATS-1 上要归功于 Suomi 等^[19], 是他们两人在卫星已经准备装配的情况下硬

是将 SSCC 加塞进去的。SSCC 云图动画显示的天气系统云系演变过程使得气象学家们大为惊诧。Johnson^[20] 评价道: “正如 Morris Tepper 所预料的, 地球同步卫星图片可以用来推断云层顶部的风场运动”。云迹风的研究很快便开始了^[21], 直到目前仍然是研究热点。早在 20 世纪 70 年代早期, ATS 图像就已经应用在预报业务中。国家强风暴预报中心 (NSSFC) 最早在 1972 年春天便采用了云图动画。

NASA 在实施极轨卫星计划的同时就研发了业务静止卫星计划。ATS 主要用作通信系统测试平台; 它在气象领域的成功促使 NASA 研发了同步气象卫星 (SMS)。SMS 是业务同步气象卫星的原型。SMS-1 于 1974 年 5 月发射, SMS-2 于 1975 年 2 月发射。这两颗卫星分别定位在 75°W 和 135°W 的赤道上空, 这两个位置至今仍然是美国 GOES 卫星的标准位置。这两颗原型星 (SMS-1 和 SMS-2) 连同随后的 NOAA GOES 系列, 为今后的同步卫星计划提供了三项重要功能: (1) 可见光和红外自旋扫描辐射仪 (VISSR) 的多光谱成像能力, 能够例行地观测地表和云层, 获取可见及红外图像。VISSR 可见光图像空间分辨率达到 1 km , 在红外窗区则为 7 km 。(2) 仅需一个便宜的接收站, 气象传真机 (WEFAX) 便能够为用户传送低分辨率卫星图像和常规天气图; (3) 资料收集系统 (DCS) 能够将偏远地区收集的资料中继传送到中央处理设备。

1977 年欧空局 (ESA) 发射了第一颗地球静止卫星 Meteosat, 它能提供水平分辨率为 2.5 km 的可见光图像和水平分辨率为 5 km 的红外窗区以及水汽图像。这些水汽图展示了地球非常另类的一面: 对流层上部流场和高层云是这类图像的主要内容, 它们清晰地反映了天气尺度系统的流型。作为 1979 年全球大气研究计划 (GARP) 的一部分, 三个 GOES 和一个 Meteosat 通力合作, 力图勾勒出大气环流特征。GARP 由空间与大气研究委员会 (COSPAR) 发起, 是首次使用卫星的国际大气科学试验。

到 1980 年, 由于在自旋扫描辐射计上增加了更多的波段, GOES 系统具有了大气温、湿度廓线反演能力, 该仪器称为 VISSR 大气廓线仪 (VAS)。首台 GOES-VAS 搭载在 GOES-4 卫星上, 于 1980 年 9 月发射升空。这些增加的通道使得卫星功能更加强大^[22]; 不过成像和廓线探测还不能同时进行。另外, 采用自旋稳定方式的卫星只有不足 5% 的观测

时间用来扫描地球,从而限制了高精度廓线探测和红外成像能力,远远不能满足用户对资料质量和数量的要求。NOAA也意识到了这些问题并着手在下一代卫星(GOES I-M)上加以解决^[23]。首颗新型卫星是1994年4月3日发射的采用三轴稳定姿态控制的GOES-8,随后数年内又发射了GOES-9到15,用以保证一东一西的双GOES系统。

目前的GOES成像仪有5个可见光及红外通道,水平分辨率5 km,能在30分钟内完成一次全景扫描,GOES上的大气探测器是目前世界上唯一的在静止轨道上的大气探测器,能够提供每小时一次的覆盖美国大陆及周边地区的大气温、湿度廓线。日本和韩国也发展了自己的地球静止卫星,其载荷与目前GOES成像仪类似。2002年,欧洲发射了MSG(欧洲第二代静止气象卫星)的第一颗星,它携带有一台包含12个可见及红外通道的成像仪,其水平分辨率达到3 km,15分钟完成一次全景扫描。下一代GOES(GOES-R)将携带包含16个通道的成像仪(ABI),红外水平分辨率将达到2 km,可见光水平分辨率则为0.5 km,全境扫描时间5分钟。这将极大地提高目前GOES卫星的观测能力。目前美国已完成了GOES-R系列静止卫星发射前的全部任务,GOES-11和13作为东西卫星维持业务运行,GOES-14和15作为备份。另外,欧洲第三代静止气象卫星MTG将携带类似ABI的高分辨率成像仪。值得一提的是,MTG还将携带高光谱大气探测器和大气化学成分探测器。

1.1.3 国外气象和环境卫星的未来发展趋势

由于种种原因,美国未来环境极轨卫星系统计划从原来1994年开始的军民合一的NPOESS(国家极轨业务环境卫星系统)调整为军民分开的DWSS(国防天气卫星系统)和JPSS(联合极轨卫星系统)。2010年2月,美国颁布了“重新构架国家极轨业务环境卫星系统”总统令,要求对1994年以来的NPOESS系统计划进行重新构划,以使其能够得到持续支持从而获得成功。按照新的计划,NOAA和美国空军(USAF)不再联合促进NPOESS,改由国防部(DOD)、NASA、和NOAA合作构建未来美国国家极轨业务环境卫星系统。由NASA和NOAA共同负责JPSS,DOD负责DWSS。考虑到天气预报和气候科学对目前NOAA在轨卫星的依赖,JPSS成为今后工作的焦点,NOAA JPSS将和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)的极轨业务卫星

系列(Metop)一起组成上午星和下午星的全球观测业务系统。JPSS卫星平台和已经取得明显进展的NPOESS准备项目(NPP)卫星平台类似,NPP的发射时间定在2011年10月,平台上的关键仪器有“可见光红外成像辐射组件(VIIRS),臭氧测绘和廓线仪(OMPS),先进技术微波探测仪(ATMS),云和地球辐射能量系统(CERES)及过轨扫描干涉型大气探测器(CrIS)”。这些仪器可以为用户提供更高时空分辨率数据,50多个大气、海洋、陆地和太阳地球系统参数,以及气候变化评估和预测所要求的连续的观测。欧洲的极轨卫星系列(Metop)和目前NOAA卫星相似,但其中红外干涉型大气探测器(IA-SI)是先进的高光谱分辨率大气垂直探测器,具有获取高垂直分辨率,高精度大气温、湿度廓线的能力。其探测能力和目前美国地球观测系统(EOS)卫星Aqua上的大气红外探测器(AIRS)及即将发射的NPP上CrIS相当。

2015年,NOAA计划在新一代地球静止业务环境卫星(GOES)上使用新的、改进后的先进的基准成像仪(ABI),它将极大地提高GOES卫星的功能。ABI有16个光谱通道,0.59~0.69 μm 可见光波段分辨率提升到0.5 km,其他波段分辨率2 km。新的成像仪扫描速率有极大提升,工作模式可以是5分钟一幅圆盘图,或者每小时4幅圆盘图(每15分钟一幅)、12幅美国大陆扫描图(5分钟一幅),加上每30秒更新一次的2个中尺度区域图(每小时240幅)。ABI提供全圆盘图像的云和水汽关键参数,全美大陆扫描(CONUS)和中尺度区域图用于监视、预报和预警中尺度强对流灾害性天气。除ABI之外,还有4个空间环境仪器和闪电定位仪。

2017年左右欧洲气象卫星组织也将拥有第三代欧洲地球静止气象卫星,它利用两颗卫星来搭载不同的仪器达到完整的观测效果,其中成像仪卫星上将拥有类似ABI这样16通道的先进成像仪和闪电监测,而大气探测器卫星则拥有高光谱分辨率的先进的红外大气垂直探测器和高光谱紫外大气垂直探测器。其中红外大气探测器用来高频次观测大气温、湿度垂直廓线,紫外大气垂直探测器用来探测大气化学成分的日常变化。

1.2 我国气象卫星的发展

1969年1月下旬,受强冷空气袭击,我国长江流域和江南地区发生了严重的冰冻、雨雪灾害,致使

华东、中南地区大范围交通受阻、有线通讯中断。此次气象灾害事件后,周恩来总理指出:“要自力更生搞基本建设,要赶快改变落后面貌,搞气象卫星。”从此,开始了我国气象卫星的发展规划和第一代极轨气象卫星风云一号(FY-1)的设计和研制^[24-25]。

1.2.1 极地轨道气象卫星——风云一号(FY-1)

1977年我国第一颗极地轨道气象卫星“风云一号”正式列入国家计划。1978年极轨气象卫星地面系统开始建设,1987年竣工,具有兼容接收和处理美国NOAA卫星的能力。1988年9月7日,“风云一号”第一颗卫星发射,被命名为“FY-1A”。“风云一号”系列气象卫星至今共发射四颗,其主要遥感观测仪器是多通道可见光红外扫描辐射仪。“FY-1A”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。经过改进,1990年9月3日发射的“FY-1B”卫星的红外图像获得了成功。由于三轴稳定姿态控制方面的问题,“FY-1A”、“FY-1B”两颗卫星的寿命都没有达到设计要求。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,其寿命达到7年以上。

FY-1卫星的遥感仪器为两台可见光、红外扫描辐射计,互为备份。扫描辐射计的星下点地面分辨率为1.1 km,数据量化等级为10比特,定标精度为可见光、近红外10%(反射率),红外通道1 K(300 K)。

表1是FY-1D卫星10通道可见光红外扫描辐射仪的探测通道波谱范围和主要用途。FY-1气象卫星也是我国最先研制和发射的对地遥感应应用卫星。它解决了太阳同步轨道卫星的发射和精确入轨、长寿命的三轴稳定姿态控制的卫星平台、高质量的可见和红外扫描辐射计、全球资料的星上存储和回放、对卫星的长期业务测控和管理、地面资料接收处理应用系统的建设和长期业务运行等一系列关键技术问题。

风云三号(FY-3)气象卫星是我国第二代极轨业务气象卫星,是在FY-1号气象卫星技术基础上的发展和提高。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,进一步提高云区和地表特征遥感能力,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-3的第一颗星FY-3A已于2008年5月27日发

表1 “FY-1D”卫星10通道可见光红外扫描辐射仪的光谱通道和主要用途

Table 1 The 10-channel visible and infrared scan radiometers of FY1D

| 通道 | 波谱范围/ μm | 主要用途 |
|----|---------------------|---------------|
| 1 | 0.58~0.68 | 白天的云图、冰、雪、植被 |
| 2 | 0.84~0.89 | 白天的云图、植被、水汽 |
| 3 | 3.55~3.95 | 地表热源晚间的云图 |
| 4 | 10.3~11.3 | 海表水温、白天和晚间的云图 |
| 5 | 11.5~12.5 | 海表水温、白天和晚间的云图 |
| 6 | 1.58~1.64 | 土壤湿度、冰、雪 |
| 7 | 0.43~0.48 | 海洋水色 |
| 8 | 0.48~0.53 | 海洋水色 |
| 9 | 0.53~0.58 | 海洋水色 |
| 10 | 0.90~0.965 | 水汽 |

射升空,其第二颗星FY-3B于2010年11月5日发射,组成上午星和下午星,实现双星组网观测。

FY-3号的特点和主要技术进步是:(1)太阳能帆板自动对日进行定向跟踪,提高星上能源系统的功率;(2)采用一个S波段,两个L波段,共3个信道传送资料,以满足星上多种探测器资料的发送和获取全球资料的需求;(3)FY-3(01批)星有11种探测仪器,它们是可见光红外扫描辐射计、红外分光计、微波温度计、微波湿度计、中分辨率光谱成像仪、微波成像仪、紫外臭氧垂直探测仪、紫外臭氧总量探测仪、地球辐射探测仪、太阳辐射监测仪和空间环境监测器^[26]。在这些探测器的协调工作下,使FY-3系列卫星成为多光谱、全天候的多功能卫星,与FY-1号卫星仅安装两个遥感探测器相比,其进步是十分显著的,是更新换代的变化。

1.2.2 地球静止轨道气象卫星——风云二号(FY-2)

中国的第一代地球静止气象卫星命名为风云二号(FY-2),是一种自旋稳定的地球静止气象卫星,卫星在赤道上空距地面大约35800 km的地球同步轨道上对地球观测,卫星在轨的任务是:(1)用星载多通道扫描辐射计进行对地观测,获取白天可见光云图、昼夜红外云图和水汽图像以及相应的气象参数;(2)通过星载转发器发送原始云图、高分辨率数字展宽云图和低分辨率云图,供地面接收站和国内外用户站接收利用;(3)收集和转发气象、水文和海洋等应用部门的数据收集平台获取的观测数据;(4)利用星载空间环境监测器,监测太阳活动和卫星轨道位置的空间环境状态,为卫星工程和空间环境监测提供观测数据。

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。1988年静止气象卫星的地面系统开始建设,1994年地面系统竣工。第一颗“风云二号”卫星发射前,在测试机房发生意外事故被烧毁。重新研制的“风云二号”第二颗卫星于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”卫星没有达到设计工作寿命。经过改进,“FY-2B”卫星于2000年6月25日发射。“FY-2B”卫星消旋天线故障的问题已经克服,但仍有信道传输方面的故障。导致每年的春分日和秋分日前后各45天的星蚀期间,“FY-2B”卫星不能向地面传递观测资料。在非星蚀期间,“FY-2B”卫星可以对北半球进行观测,图像仍旧可以使用。2003和2004年汛期,在日本GMS5气象卫星停止工作的情况下,“FY-2B”卫星为我国广大台站和国际用户提供了有效的云图服务。

按照我国地球静止气象卫星的发展计划,中国第一代地球静止气象卫星将分为三个批次:01批卫星包括两颗星FY-2A和FY-2B,属于试验型地球静止气象卫星;02批有三颗星FY-2C、FY-2D和FY-2E,为业务型地球静止气象卫星。目前在轨运行,并提供应用服务的是FY-2D和FY-2E,它们分别于2006年12月8日和2008年12月23日发射成功,分别位于 105°E 和 86.5°E 赤道上空。相对01批卫星,02批卫星技术性能有较大改进,主要包括星载扫描辐射计由01批的3通道增加到5通道,若干主要技术指标也有所提高;02批增加了星上蓄电池供电能力,以保证卫星在春、秋分前后进入地影期间对全星供电,星上仪器不关机。03批预计有三颗星FY-2F、FY-2G和FY-2H,卫星性能将在02批卫星的基础上有适当改进。增加03批卫星计划的主要目的是确保在轨运行的第一代地球静止气象卫星向第二代静止气象卫星实现连续、稳定的过渡。整个第一代地球静止气象卫星在轨运行并提供应用服务的时间到2015年前后^[27]。

1.2.3 中国气象卫星的未来发展

中国气象卫星发展的总体规划和目标是:2012年前,建立由风云二号和风云三号等多种卫星组成的对地综合观测业务平台,提高卫星数据的量化处理和天气分析、数值预报、地球环境领域的应用水平,完善卫星数据和产品的共享体系,使我国卫星观测及应用水平达到20世纪末世界先进水平。

2020年前,建立以风云三号、风云四号系列卫星为代表的高、低轨道业务卫星组成的综合对地观测平台,实现对地球气候系统五大圈层及其相互作用的连续、稳定、可靠观测。卫星观测的时间、空间、光谱分辨率和辐射测量精度显著提高,对中、小尺度天气和地球环境的探测能力明显增强;量化的卫星数据和产品在气象预报以及地球环境监测预测中被各级业务、科研部门广泛应用。

具体的气象卫星研制和发射计划安排是:风云三号01批极轨卫星,在已经成功发射的风云三号A星和B星组成的上午星、下午星业务卫星观测系列的同时,还将发展低倾角降水测量雷达卫星。组成三星组网的地球观测新网络。风云二号02批静止卫星,由已发射的D星和E星组成在轨“双星运行、互为备份”的业务格局。风云二号03批静止气象卫星包括3颗星,卫星主要技术状态与02批保持一致,仅做适当调整,原计划在2010—2014年发射。风云四号静止气象卫星是我国第二代静止气象卫星,包括光学和微波两种类型的卫星。卫星将采用三轴稳定的姿态控制方式和具有探测表面特征、大气温湿三维分布、闪电和空间天气监测等方面的能力。目前已完成光学星关键技术攻关,计划2015年前后发射首颗试验卫星。

1.3 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,通过各气象卫星发射和运行的国家共同努力下建成的天基探测系统。

图1是目前正在运行的全球业务气象卫星探测系统。它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35800 km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(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 1 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。

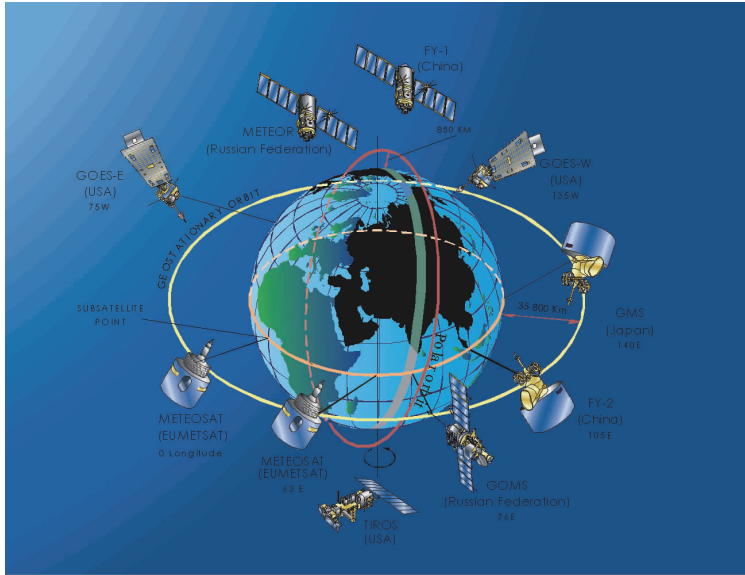


图 1 全球业务气象卫星探测系统

Fig. 1 Global operational meteorological satellite systems

2 气象卫星对大气科学的影响和作用

2.1 气象卫星云图对天气分析和预报的作用

正如 Oliver 等^[28]所预言的,一旦星载存储能力可以提供卫星观测的全球覆盖资料,国家环境卫星局便可以为预报中心提供业务化的卫星支持。根据 Oliver 等^[29]的研究,急流、对流层中部的槽线和脊线、涡度中心等天气系统均可以形象地从“艾萨”图像上识别出来。尽管从卫星计划一开始人们就想到可以根据卫星云图来定位跟踪热带风暴^[30],但这个想法只有到“艾萨”卫星提供连续的云图之后,才成为日常预报的项目之一^[31]。

Rao 等^[32]认为通过卫星探测能力的改进,“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”。TIROS-N 上的仪器已经用于提供例行的温、湿度廓线信息、地表温度和云参数。这些资料被大量地应用到跟临近预报以及业务短期天气预报相关的领域,包括:(1)次天气尺度温、湿度场分析,应用于灾害性天气的监测和预报;(2)次天气尺度地表温度分

析;(3)次天气尺度大气稳定度分析;(4)次天气尺度下,更新飞机导航网格点上的温度及风场资料;(5)估算云高和云量;(6)估算热带气旋的强度、最大风速和中心位置;以及(7)估算臭氧总量。

上述资料已经成为国际常规天气服务的一部分^[33]。

正如极轨卫星图像有助于研究天气尺度现象,静止卫星图像则有助于加深对中尺度现象的研究。在静止卫星上天之前,关于中尺度的资料很少,气象学家不得不从大尺度观测来推测中尺度现象。如今,静止卫星相当于在地球上每隔 1 km 建立了一个气象站,及时汇集固定气象站不容易探测到的信息。在卫星图像上不同类别的云、云量、云顶亮温及纹理,形象地反映了中尺度气象过程。通过云图动画可以观察到一些重要的中尺度特征,从而为中尺度过程的研究和中尺度强对流天气的预警提供了新的思路。此外,通过动画可以看到强对流过程的时空演变,这些演变过程跟相应的触发机制符合得很好^[34]。根据地球静止卫星图像,人们发现了大量重要的中尺度现象,这些发现极大地影响了中尺度气象学以及短时临近预报,例如:(1)在飚线形成前,在地表辐合区通常会有排列整齐的积云发展,通过

卫星云图可以很容易发现它们^[35]。目前已经能利用卫星云图确定飚线发展区域,以及灾害天气监测时段。(2)在所有风暴系统的发展演变过程中,风暴的流出边界(通常称为弧状云线)是非常重要的特征。它的重要性也是通过卫星云图动画才首次认识到^[35]。在1984年3月28日,一个强大的龙卷风系统横扫南北卡罗莱纳州,因为事先及时通过卫星云图监测到了这个系统的母体,从而为这一区域提供了足够的准备时间^[36]。此外,多普勒雷达也已经证实弧状云线在短期对流预报中的重要性^[37]。(3)通过静止卫星红外图像,人们才注意到中尺度对流复合体的大小、持续时间及其发展强度^[38]。这些复合体导致了中西部地区每年夏季主要的降水过程,从此成为重点研究对象。(4)定位、跟踪以及监测飓风和热带风暴是静止气象卫星最重要的成果之一^[39]。一套通过卫星资料估计飓风强度的方法已经在国家飓风中心(NHC)投入业务运行^[40]。时任NHC主任的Sheets^[41]说:“Dvorak本人及其他人发展的飓风定位及其强度估计技术,迄今在热带气旋业务预报领域是唯一的最重大的成就”。(5)在极轨卫星项目之前,极地低压系统的存在还没有得到广泛认同^[42]。近年来,静止卫星图像已经用来研究拉布拉多海岸附近的极地低压系统的形成^[43]。(6)早晨云盖对下午对流的发展有一定影响。直到静止卫星时代人们才认识到这一点^[44-45]。随后通过一个复杂的中尺度模型证实了这一现象的重要性^[46]。(7)卫星图像对人们探测、预报浓雾也有重大影响。内向混合过程在预报雾的消散中所起的作用直到^[47]分析静止卫星图像后才广为人知。利用极轨卫星云图探测雾已有多年历史,这里所采用的是一项多光谱技术^[48],可以昼夜全天候工作。该技术已经移植到GOES多光谱图像上^[49],用来监测晚间雾的形成。(8)GOES 6.7 μm 红外通道受到上层水汽的强烈影响,通常称为水汽通道。使用该通道图像可以描绘出对流层上层气流的运动,气象学家们因此可以观察到前所未有的天气系统随时间的演变。Velden^[50]以及Weldon等^[51]的研究表明,该通道或许在天气以及中尺度范围内有更多的应用。(9)目前极轨卫星上的卫星高光谱大气探测器(AIRS,IASI)能够提供台风环境场范围内高精度的大气温、湿度廓线,研究表明,通过同化技术,这些大气温、湿度廓线能够有效提高台风的路径和强度预报^[52-53]。GOES资料已经成为国家天气服务机构

(NWS)的一项重要组成部分。NWS在总部直接接收全盘GOES数据流,地方气象部门则通过高级气象交互处理系统(AWIPS)接受全套数字图像。其他量化的产品,例如云迹风、红外大气廓线及稳定度参数、还有降水量,均能通过常规GOES资料获得。

自1975年以来,快速成像是GOES研究计划中的重要内容。通过研究SMS以及GOES图像,人们已经能获得时间间隔为3分钟的连续卫星图像,用来研究强风暴演变过程^[54-56]。在1979年的SESAME(Severe Environmental Storm And Mesoscale Experiment)项目中,通过协调两颗GOES卫星的观测时间获得了间隔为3分钟的快速扫描图像,对风暴研究帮助很大。对这些图像使用投影技术,Fujita^[54]和Hasler^[57]准确地确定了云高。在他们之前Bristor等^[58]也做过类似的工作。另外还有一些精彩的研究也应用到快速GOES图像,比如分析雷暴强度^[59-60],跟踪飓风附近云的运动^[61-62]。多年来,多项科研成果获得了业务应用。到20世纪80年代中期,每当有强风暴发生,5分钟间隔的卫星图像就成为日常业务的一部分。近年来,已经有人用间隔1分钟的GOES-8图像来研究各种天气现象,包括强对流、飓风以及云的运动^[63]。

我国的气象工作者围绕在天气分析和预报工作中如何应用卫星云图也开展了多方面的研究。1969年我国开始接收美国“艾萨”卫星的APT气象卫星云图,卫星气象工作者利用卫星云图,从天气学的角度,对影响我国的天气系统进行了全面的分析,大大深化了我们在这方面的认识。其中主要包括:在台风和热带天气系统分析方面,提出了台风的定位和强度估计方法,台风发生发展过程中的云型演变,赤道辐合带的特征及热带云团;在中纬度天气系统分析方面,概括出了锋面和气旋的云型特征,尤其是在高空旋涡和梅雨锋结构等方面的研究工作更多、更深入;在高空急流、西南低涡和暴雨的降水云系特征等方面,也有相应的研究工作。有关这段时期的研究成果,在陶诗言等^[64]和吕达仁等^[65]的综述文章中均有较详细的介绍,并给出较全面的参考文献。

1980年以来,随着气象卫星定量遥感探测能力的增强和日本GMS静止气象卫星资料的应用,卫星探测资料在暴雨、中尺度对流云团等方面的研究更加深入。从分析梅雨锋上的强降水入手,认识到镶嵌在锋面云带内的中尺度对流云团(MCS)是产生强降水的实体,给出了云团的动力学和热力学结

构及其最有利于中尺度暴雨云团发展的高、低层天气尺度系统的配置^[66]。在对中尺度对流复合体发展、演变分析的基础上,提出了对它们进行识别和追踪的方法^[67-68]。通过对华南地区中尺度对流云团特征的统计分析,指出了云团活动的源地,及其日变化特征,以及我国南方的中尺度对流复合体(MCC)^[69]。

随着由多种气象卫星传感器得到的资料种类及其加工产品的增加,如何利用多种信息揭露暴雨云团的特征就提上了日程。覃丹宇等^[70]把云图的 TBB 资料、ATOVS 反演的温湿度场资料、OLR、云导风资料和水汽图像等资料结合在一起,较好地揭示了一次暴雨过程的多尺度特征及其中的中尺度暴雨云团的活动与演变。

在《暴雨系统的卫星遥感理论和方法》^[71]一书中,利用多种遥感信息,从多个侧面分析了 2002 和 2003 年多次暴雨过程的行星尺度和天气尺度的特点,尤其是其中的中尺度暴雨云团的活动及演变。不仅揭露了暴雨过程中天气尺度系统与中尺度系统之间的相互作用,暴雨的多尺度特性及中尺度对流复合体(MCC)与中尺度对流系统(MCS)之间的共同点和差异,还给出了一个中尺度对流复合体的三维结构。

降水估计是卫星资料应用的一个重要方面,国内外许多气象工作者从事这方面的研究,形成了可供业务应用的方法。吴蓉璋等^[71]利用云型识别技术,发展出了利用 GOES 卫星的可见光和红外通道的辐射测值估计三级降水率(即 0 级无雨: $0 \leq R \leq 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 1 级小雨: $0.5 \leq R \leq 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 2 级强降水: $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R$)的方法。王立志等^[72]利用 GMS-5 的 4 通道云图,发展了自动云分类技术,并在此基础上提出了降水估计方法,卢乃锰等^[74]在分析我国降水云团的灰度、灰度梯度及其随时间演变等特征的基础上,提出利用卫星资料估计对流性降水的方法,并制作成业务应用软件,进行试验应用。郁凡等^[75]在分析 GMS-5 卫星多光谱传感器的光谱特性与降水的关系之基础上,发展出可以估计六种不同降水状况(晴空、无雨、小雨、中雨、大雨和暴雨)的降水强度场分析技术。

利用气象卫星资料分析热带气旋已经成为气象业务工作的内容之一,发挥了很好的效益。方宗义等^[76-77]在分析热带气旋不同发展阶段的云型特征的基础上,提出了利用卫星云图估计热带气旋强度的

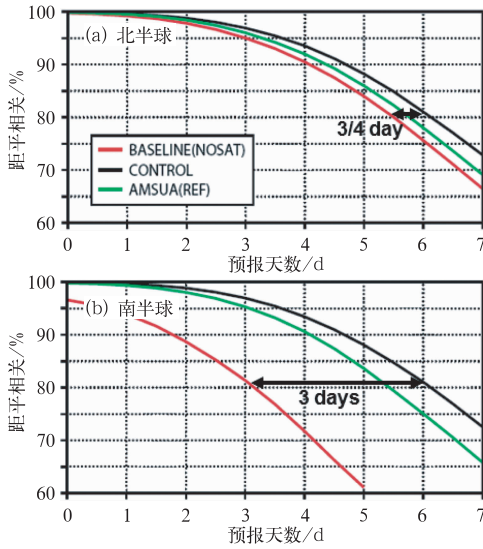
方法。江吉喜^[78]在 Dvorak 方法的基础上,提出了一个利用增强红外卫星云图分析热带气旋的方法,包括确定热带气旋中心位置和估计热带气旋强度等两个部分。方翔等^[79]则利用高密度的卫星云迹风资料分析发展和不发展两类热带气旋的对流层上部环流特征,指出了西风急流和对流层上部槽(TUTT)的位置对于构成热带气旋发展的高空辐散场具有十分重要的作用。丁伟钰等^[80]利用 TRMM 卫星得到的 3 小时降水资料分析了 2002 年登陆广东的热带气旋的详细降水分布,揭示了外围降水加大,则中心附近降水减弱。

2.2 气象卫星资料对数值天气预报的影响

由于卫星管理机构更名为国家海洋与大气局(NOAA),1972 年 10 月中旬发射的 ITOS 系列第三颗星就被命名为“诺阿-2”号(NOAA-2)。它除携带了第一台甚高分辨率扫描辐射仪(VHRR)而外,还有用作业务探测的大气温度垂直廓线辐射仪(VTPR)。把卫星探测的全球大气状况参数输入数值预报模式是改善常规探测资料不足,提高模式预报精度和延长预报时效的重要手段,也是发展卫星探测技术的初衷之一。这些垂直廓线资料经过预处理即可投入数值预报模式^[81]。这套预处理程序简称为 SINAP,即卫星输入数值分析和预测。

但长期以来,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^[82]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,输入的观测资料中 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 2 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。图 3 则给出了多种卫星遥感资料对减小预报误差的贡献。它表明,AMSU、先进的红外探测器、GPS-RO、SCAT 等的贡献最显著。对于单一仪器来讲,AIRS 对预报误差减少的贡献最大。

我国的气象工作者在数值预报模式中如何应用卫星测值也经历了一个较长的探索过程。20 世纪



现在对ECMWF数值天气预报最重要的探测仪器

- 先进的红外探测器
- 微波探测器/成像仪
- GPS发射机/接收机
- GEO红外成像仪/探测器
- 散射计
- UV/VIS/IR光谱仪

图 2 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

Fig. 2 The impact of satellite observations on the 2007 ECMWF numerical weather forecasting system (500 hPa geopotential height anomaly correlation)

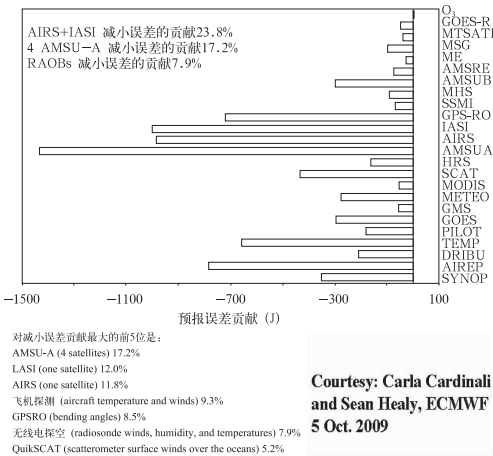


图 3 各种卫星遥感资料对减小数值预报模式误差的贡献

Fig. 3 The contributions of various satellite observations to forecast error reduction

90 年代初, 试验把 NOAA 卫星 HIRS 探测资料处理得到的大气厚度场资料输入北半球数值预报系统, 进行影响试验。结果表明存在影响, 且与地区和天气系统有关^[83-84]。此后, 有不少气象工作者, 从不同的角度, 采用不同的技术途径, 探索如何在数值预报模式中用好卫星遥感资料、以期得到正效应^[85-89]。

2003 年, 在中国新一代数值预报系统 (GRAPES) 的三维变分同化框架内实现了对 NOAA 等系列卫星 ATOVS 资料的直接同化^[90]。此后, 在卫星资料的偏差订正, 地表比辐射率计算的改

进等与卫星遥感资料同化相关的问题也取得了有价值的成果^[91-92]。由静止卫星得到的 AMV 产品是数值预报模式同化系统要解决的问题之一。近年来在云高的确定、质量控制等方面有新的改进。在此基础上, 在 FY-2 卫星的 AMV 资料的同化应用方面作了进一步研究, 提高了在数值预报中的使用率^[93]。

近几年来气象卫星资料在中国数值预报中的贡献已经大幅度增长, 以目前在国家气象中心试验运行的中国新一代全球预报系统 (GRAPES-GFS) 为例, 同化的卫星资料量已占总资料量的 40% 左右, 卫星资料的同化带来了中期数值预报的明显改进, 特别是常规资料稀缺的南半球地区, 同化使可信预报延长了两天左右。对常规资料稠密的北半球, 中期预报时效也有明显提高^[94]。

2008 年 5 月, FY-3A 成功发射后, FY-3A 数据在数值天气预报中的同化应用情况立即受到广泛关注。根据中国气象局和欧洲数值预报中心双边合作协议, 利用欧洲数值预报中心的工作平台进行了“FY-3A 卫星资料在欧洲数值预报中心 (ECMWF) 同化应用”的研究。目前已成功地将 FY-3A 卫星四个仪器 (微波温度计 MWTS、微波湿度计 MWSH、红外分光计 IRAS 和微波成像仪 MWRI) 的资料同化进入 ECMWF/同化系统中。FY-3A 资料经过偏差订正后, 在 ECMWF IFS 系统中同化显示正效果; FY-3A 四个仪器的模拟误差与国际先进同类仪

器相比,总体相当但略偏大。图 4 给出了在 ECMWF IFS 系统中使用的经过偏差订正后的四个仪器模拟偏差均方根误差与 METOP/AMSU 相应仪器比较结果。由图可见,经过偏差订正后 FY-3A 四个仪器的模拟误差总体相当,但略偏大。图 4 指出同化 FY-3A 各仪器及其同类仪器相对于 Baseline 试验(包含常规探空观测资料、SSMI 和 GPS 资料)的

同化效果,表明同化微波温度计资料与同化 AMSU(通道 3、5、7 和 9)相对于 Baseline 试验而言,其结果有所改善,北半球 MWTS 与 AMSU-A 效果相当,在南半球同化效果相当于 AMSU-A 的 70% 左右;同化 IRAS 与同化 MWTS 有类似效果,但相应影响要小于 MWTS;同化微波湿度计得到与 METOP MHS 相当的效果^[95]。

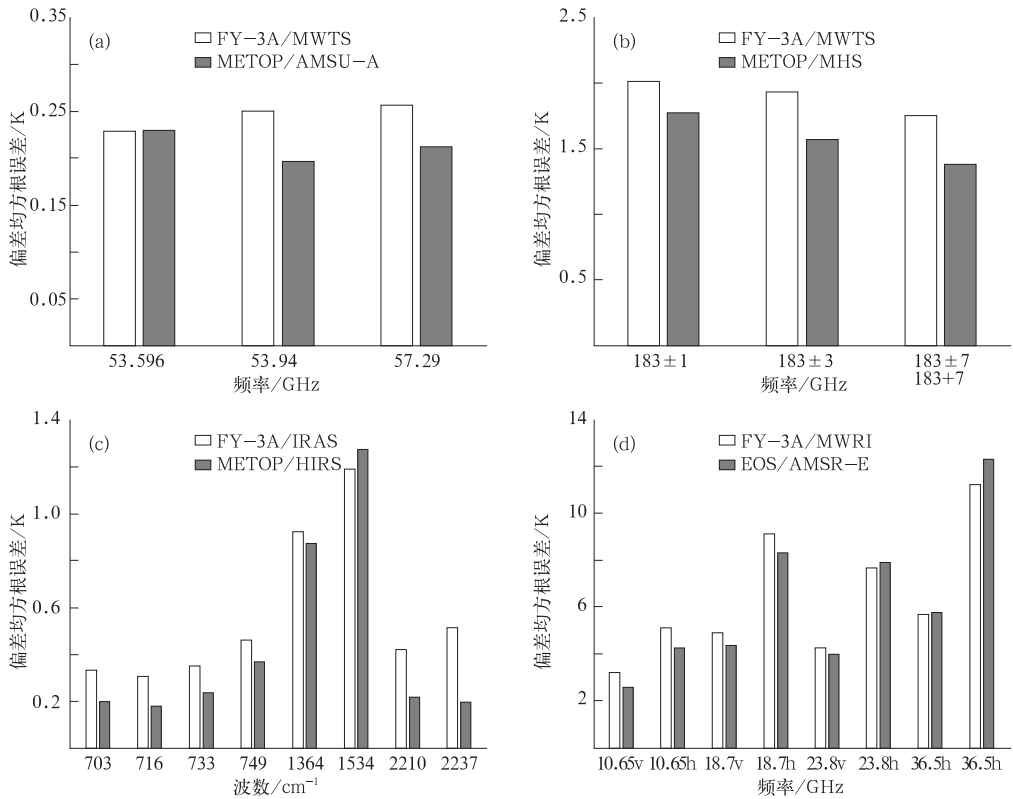


图 4 同化系统中所用 FY-3A 资料模拟偏差均方根误差比较(偏差订正后)

Fig. 4 The standard deviations of FY-3A infrared and microwave sounding observations using forecast (first guess) as reference and the comparisons with other instruments

根据 FY-3A 资料在我国 GRAPES 数值预报模式中的同化应用需求,按照 FY-3A 仪器特点和数据特征,研发出独立于 ECMWF IFS 系统的偏差订正方法。这是一个从仪器在轨参数、定标原理以及同化原理综合考虑模拟偏差的全新方法。

2.3 气象卫星资料在气候变化监测、预测和研究中的作用

气候变化的监测、预测和研究是近年来大气科学中最受关注、最热门的问题。由于制约气候的因素多,涉及地球系统科学五大圈层多种不同尺度的地球物理和地球化学过程。其中许多制约气候变化

的、行星尺度的地球物理参数主要靠卫星遥感的手段获取。

2.3.1 监测全球大气温度变化

图 5^[96]是从三个研究小组各自处理的长时间序列 MSU 资料中得到的 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。该图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。尽管这三个小组处理的 MSU 资料给出的变化率有些差异,但它们的变化趋势是一致的。

另外,将上述资料分别与同期的 NCEP 资料和 GPS 掩星观测资料比,其变化趋势的一致性说明,

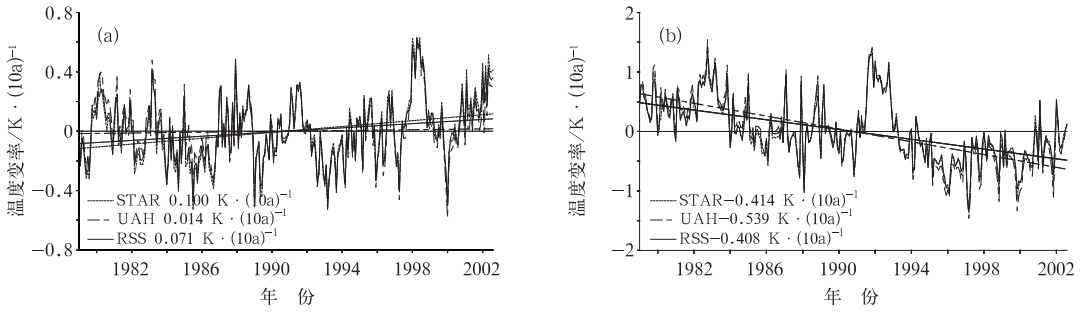


图 5 由三个小组处理的 MSU 数据估计得到的 1979—2001 年全球高空大气温度变化趋势
(a) 对流层中层, (b) 平流层低层

Fig. 5 Global atmospheric temperature trends (1979—2001) derived from MSU by three different groups
(a) for middle troposphere and (b) for lower stratosphere

经过处理的长时间序列 MSU 资料可用于大气温度的气候监测。

2.3.2 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。上世纪末和本世纪初各国为此发射了一系列卫星,如:1995 年 4 月 21 日发射的 ERS-2 上的全球臭氧监测仪(Global Ozone Monitoring, GOME)^[97];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)^[98];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)^[99];2008 年 7 月 25 日我国发射的风云三号 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可以得到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。图 6 是 Fishman 等得到的 1979—2000 年平均的全球对流层臭氧垂直柱密度分布图。在北半球夏季对流层的臭氧柱总量达到最大值,在印度的东北部,美国东部、中国东部以及非洲的西部与南部地区是臭氧污染比较严重的地区^[100]。

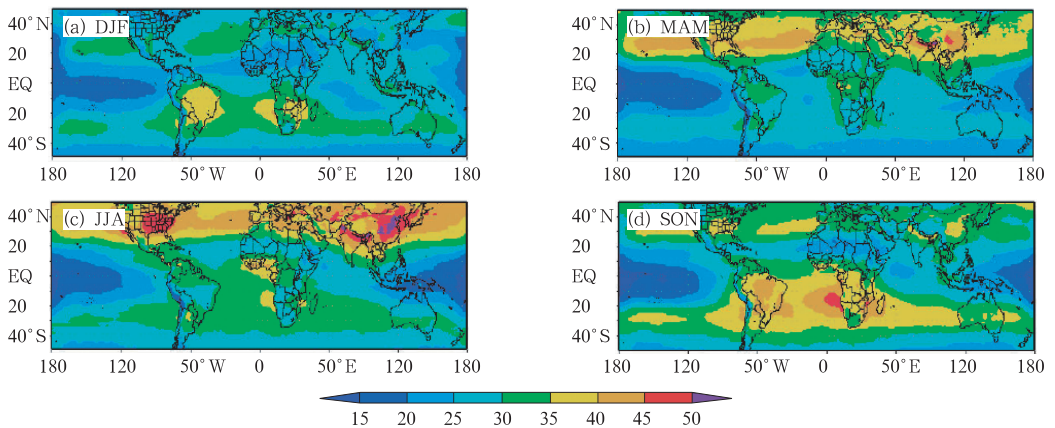


图 6 全球对流层 O₃ 的 20 年平均(1979—2000 年)垂直柱密度(单位:DU)分布图
(a) DJF(12—2 月), (b) MAM(3—5 月), (c) JJA(6—8 月), (d) SON(9—11 月)

Fig. 6 Global tropospheric column ozone distributions for four seasons averaged over a period of 20 years (1979—2000)

(a) DJF (Dec—Jan—Feb), (b) MAM (Mar—Apr—May), (c) JJA (Jun—Jul—Aug), (d) SON (Sept—Oct—Nov)

2.3.3 环境和自然灾害监测中的应用

监测地球系统科学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 Nino 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,它们的季节变化和年际变化的基本依据。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。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、1 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。

3 卫星气象面临的机遇和挑战

当前,气象卫星正处于蓬勃发展的态势,卫星气象也是方兴未艾,但大气科学的发展和气象业务服务对卫星气象学提出了更强、更严格的需求,使卫星气象学在面临良好的发展机遇的同时也面临严峻的挑战。

3.1 绝对辐射定标和真实性检验

通过遥感手段获取定量的地球物理和化学参数,是当前对地观测卫星所面临的最前沿问题,其核心就是辐射定标。要对卫星遥感探测器获取的地球大气辐射测值进行绝对定标,就面临以下三个难题:没有理想的参考黑体,探测器的光谱响应函数不精确,及非线性效应。为了解决这一难题,已经采取了卫星发射前实验室定标、星上安装黑体进行定标、把太阳光引入星体定标,以及卫星在轨运行时利用地

面辐射校正场星地同步观测定标,和不同卫星在同一时间观测同一地区的相互定标等多种手段,但仍未取得满意的结果。以气候监测和研究所需要的长时间序列卫星遥感资料为例,就面临如下与辐射测量相关的校正问题:不同卫星、不同过赤道时间和不同覆盖范围之间的校正;卫星轨道漂移所带来的观测地方时不同和卫星轨道高度变化的校正;遥感探测器退化所带来的灵敏度变化的校正;受宇宙线照射和轨道高度变化所带来的星上定标黑体温度变化的校正等。

由于卫星辐射测量误差、反演算法误差、地气系统辐射相互影响的存在,导致反演的产品总是存在误差,需要通过产品的真实性检验工作来比对、分析反演产品精度,并通过检验结果来改进反演算法。真实性检验就是用实际观测的气象要素和地球物理参数去检验由卫星遥感得到的相应时刻和地点的各种反演产品。遥感产品的真实性检验涉及到同步实测数据的获取与数据的积累,是一项长期的、逐步完善的工作。

3.2 发展快速精确的辐射传输模式

辐射传输模式是卫星遥感资料处理、生成定量参数的关键。快速精确的辐射传输模式是在逐线模式的基础上发展起来的,逐线模式(例如 LBLRTM)的精度很大程度上决定了快精模式的精度,而 LBLRTM 中仍然需要改进的部分有:建立完备的大气分子吸收和散射数据库,尤其是水汽的连续吸收。目前国外开发的比较实用的快精辐射传输模式主要有欧洲的 RTTOV 及美国的 CRTM,目前这两种模式均可包含从可见、近红外、红外到微波的各种仪器,红外和微波波段计算精度较高,但在可见光波段计算精度较差,而且有云时的辐射传输计算至今是个挑战。我国必须尽快开发有自己的快速精确辐射传输模式,这是反演卫星产品和同化卫星资料的基础。在开发快精辐射传输模式时,重点应放在:(1)处理好地表比辐射率在辐射传输计算中的贡献;(2)开发云雨大气时的辐射传输模式,发展精确的云粒子吸收和散射模式;(3)发展可靠的检验快精辐射传输模式的方法;(4)开发高光谱仪器的辐射传输模式;(5)在辐射传输模式中将光谱从微波、红外,扩展到近红外、可见和紫外波段。

3.3 全球数值预报模式中同化卫星遥感的水汽等资料

卫星资料在全球数值天气预报中已得到了很好的应用并使得南半球天气预报时效提高了3天、北半球提高了近1天。高光谱红外大气探测器资料(AIRS和IASI)所起的作用很大,但目前在全球模式中使用的AIRS和IASI资料主要是温度通道,而且主要是海洋上晴空区的资料。卫星的温度观测资料在全球数值预报模式中作用很大,但由于水汽的时空变化特性并且水汽输送是降水的必要条件,水汽观测资料在模式中的应用极为重要。目前国际上在这方面进展不大,如何在数值预报模式中用好卫星水汽观测资料是个挑战性科学问题。主要原因在于水汽通道的辐射量由经过大气辐射和水汽吸收后得到,因而既包含了大气温度信息,又包含了大气水汽信息。由于水汽参数和辐射量之间的高度非线性,使得在目前的同化系统中很难把温度和水汽有效分开而达到正效应。

3.4 在区域模式中同化高分辨率卫星遥感资料

随着新一代地球静止气象卫星的发展(例如,美国2015年即将上天的GOES-R系列,2017年欧洲第三代地球静止气象卫星,2015年中国风云四号地球静止气象卫星),高时间和空间分辨率卫星探测资料将极大地提高地球环境监测和各种灾害性天气预警预报能力。其中一个主要的挑战就是将高分辨率资料用于中尺度区域数值预报模式来提高灾害性天气的短期预报能力,这需要发展高分辨率的具有良好云物理参数化过程的区域模式,利用四维变分同化技术,充分将卫星观测资料的时空信息同化到预报场中。由于资料和模式的分辨率都很高,资料量大,同化过程计算成本高,因此在高分辨区域模式中同化地球静止气象卫星资料是个难点。在将来区域模式应用研究中,应注重重要资料的开发和在区域模式中的应用,重点在用好水汽、云和降水等观测资料,另外必须建立数值模式参数和卫星反演得到的大气参数之间的有效连接,例如卫星得到的云参数通常是云顶高度、光学厚度和粒子大小,而数值模式需要的云参数通常是云水廓线垂直分布。

3.5 发展先进的反演方法

未来在提高辐射传输模式的基础上发展先进的

反演算法是提取高精度地球物理参数的关键。反演方法中需要突破的几个难点问题在以下几个方面。

(1)如何在反演中将温度和水汽信息分开,例如在红外谱段,卫星观测到的辐射量既包含了大气温度的信息,也包含了水汽吸收的信息,发展有效的反演方法将温度和水汽分开,获得高质量的大气温、湿度廓线,是用好大气探测器资料的关键。

(2)在反演大气成分过程中,如何将大气温度、水汽及地表的贡献分开是提取大气成分定量分布的关键。例如在利用红外遥感 CO_2 的方法中,如何将大气温度和 CO_2 分开是得到 CO_2 定量反演的关键。

(3)如何将地表温度和地表比辐射率分开是提高地表温度反演精度的关键,由于地表温度和地表比辐射率合在一起代表了地表发射的贡献,通常在反演中很难将这两者分开。最近一个新的尝试是利用时间分辨率信息^[101],例如,在地球静止卫星红外遥感中,可以假定地表温度在一段时间内是变化的,而地表比辐射率在一段时间内是基本不变的,这样就可以利用多时次的观测资料来反演可变的的地表温度和不变的地表比辐射率。

(4)如何处理云,在反演大气温、湿度廓线和大气成分中也是需要首要考虑的问题。不管用何种谱段来遥感大气,其反演问题几乎都要面临这个问题。例如在高光谱红外遥感大气温、湿度廓线反演中,通常用寻找晴空像元法、黑体云假定法、晴空订正法^[102]及利用有云时的辐射传输模式法,这些方法各有自身的局限,例如晴空像元法覆盖率低,黑体云假定法没有考虑到云的比辐射率随光谱的变化,晴空订正法需要假定相邻视场云的空间均匀性,而利用有云时的辐射传输模式则需要模式有较高的精度。如何在反演中处理云仍然是个挑战性问题。

(5)另外,还有如何处理地表的特性,近地面大气参数的反演,多源数据融合,背景场误差的确定等对得到高精度的反演产品也极其重要。

致谢:感谢韩威、廖蜜等同事为本文撰写提供的资料。

参考文献

- [1] Allison L J, Wexler R, Laughlin C, et al. Remote sensing of the atmosphere from environmental satellites[M]. X-901-77-132 Preprint, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., 1977, 111pp.
- [2] Hass I S, Shapiro R. The NIMBUS satellite system—Remote sensing R & D platform of the 70s[G]. NASA Conference Publication 2227, 1982, 17-30.

- [3] King J I F. The radiative heat transfer of planet earth. Scientific use of earth satellites [M]. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1956, 133-136.
- [4] Kaplan L D. Inferences of atmospheric structures from satellite remote radiation measurements[J]. J Opt Soc Am, 1959, 49, 1004-1014.
- [5] Wark D Q, Fleming H E. Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites [J]. Mon Wea Rev, 1966, 94: 351-362.
- [6] Wark D Q, Hilleary D T, Anderson S P, et al. NIMBUS satellite infrared spectrometer Experiments[J]. IEEE Trans Geosci Electron, 1970, GE-8, 264-270.
- [7] Smith W L. Iterative solution of the radiative transfer equation for temperature and absorbing gas profiles of an atmosphere[J]. Appl Optics, 1970, 9: 1993-1999.
- [8] Smith W L, Hilleary D T, Fischer J C, et al. NIMBUS ITPR Experiment[J]. Appl Optics, 1974, 13: 499-506.
- [9] Staelin D H, Barrett A H, Waters J W, et al. Microwave Spectrometer on the NIMBUS-5 Satellite; Meteorological and geophysical data[J]. Science, 1973, 182: 1339-1341.
- [10] Smith W L, Staelin D H, Houghton J T. Vertical temperature profiles from satellites—results from second generation instruments aboard NIMBUS-5[C]. Proceedings of the COSPAR Symposium on Approaches to Earth Survey Problems Through the Use of Space Techniques, Akademie-Verlag, Berlin, 1974, 123-143.
- [11] Smith W L, Woolf H M, Hayden C M, et al. The TIROSN operational vertical sounder[J]. Bull Amer Met Soc, 1979, 60: 1177-1187.
- [12] Smith W L, Nagle F W, Hayden C M, et al. Vertical Mass and Moisture Structure from TIROS-N[J]. Bull Amer Met Soc, 1981, 62: 388-393.
- [13] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90: 11 587-11 601.
- [14] Matson M, McClain E P, McGinnis D F, et al. Satellite detection of urban heat islands[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106: 1725-1734.
- [15] Matson M, Dozier J. Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor[J]. Photogramm Eng Remote Sensing, 1981, 47: 1311-1318.
- [16] Tarpley J D, Schneider S R, Money R L. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite[J]. J Climate Appl Meteor, 1984, 23: 491-494.
- [17] Smith W L, Bishop W P, Dvorak V F, et al. The Meteorological satellite: Overview of 25 years of operation[J]. Science, 1986, 231: 455-462.
- [18] Suomi V E, Parent R. A color view of planet earth[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1968, 49: 74-75.
- [19] Suomi V E, Newell H. Spin cloud camera, In—Global Weather Prediction—the Coming Revolution[M], 186-201, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, Ny. 1970.
- [20] Johnson D S. Development of the operational program for satellite meteorology [R]. NASA Conference Publication 2257, 1982, 34-40.
- [21] Hubert L F, Whitney L F, Jr. Wind estimation from geostationary-satellite pictures[J]. Mon Wea Rev, 1971, 99: 665-672.
- [22] Smith W L, Suomi V E, Menzel W P, Woolf H M, et al. First Sounding Results from VAS-D[J]. Bull Amer Met Soc, 1981, 62: 232-236.
- [23] Menzel W P, Purdom J F W. Introducing GOES-I: The first of a new generation of geostationary operational environmental satellites[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1994, 75: 757-781.
- [24] 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[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 550-560.
- [25] 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 2010, 36(7): 94-100.
- [26] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [27] 许健民, 钮寅生, 董超华, 等. 风云气象卫星的地面应用系统[J]. 中国工程科学, 2006, 8(11).
- [28] Oliver V J, Ferguson E W. The use of satellite data in weather analysis[M]. Satellite data in meteorological research // van de Boogaard, H. M. E. (ed), 1966 NCAR-TN-11, National Center For Atmospheric Research, Boulder, Co, 1966, 349pp.
- [29] Oliver V J, Anderson R K, Ferguson E W. Some examples of detection of jet streams from TIROS photographs[J]. Mon Wea Rev, 1964, 96: 470-471.
- [30] Sadler J C. Average cloudiness in the tropics from satellite observations[M]. East-West Center Press, Honolulu, HI, 1968, 22pp.
- [31] Dvorak V F. A technique for the analysis and forecasting of tropical cyclone intensities from satellite pictures[R]. NOAA TM, NESS 36, NOAA, NESS, U. S. Dept of Commerce, 1972, Washington, D. C.
- [32] Rao P K, Holmes S J, Anderson R K, et al. Weather Satellites: Systems, Data, and Environmental Applications[M]. Amer Meteor Soc., Boston, 1990, 503pp.
- [33] Chedin A. Technical Proceedings of the Fifth International TOVS Study Conference[C]. Toulouse, France, 24-28 July 1989.
- [34] Purdom J F W. Satellite observations of tornadic thunderstorms. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards[J]. Geophysical Monograph, 1993, 79: 265-274.
- [35] Purdom J F W. Some uses of high resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior [J]. Mon Wea Rev, 1976, 104: 1474-1483.
- [36] NOAA. The March 28, 1984 Carolina Tornado Outbreak. Disaster Survey Report to the Administrator[R]. NOAA,

- U. S. Dept of Commerce, Washington, D. C. 1984.
- [37] COMET. Boundary layer detection and convective initiation module[R]. University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, CO. 1992.
- [38] Maddox R. Mesoscale convective complexes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1980, 61: 1374-1387.
- [39] Rao P K, Holmes S J, Anderson R K, et al. Weather Satellites: Systems, Data, and Environmental Applications[M]. Boston, Amer Meteor Soc, 1990, 503pp.
- [40] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data[R]. NOAA Tech Rep, NESDIS 11, Washington, D. C. 1984.
- [41] Sheets R C. The National Hurricane Center—Past, Present, and Future[J]. *Weather and Forecasting*, 1990, 2: 185-232.
- [42] Twitchell P F, Rasmussen E A, Davidson K L. Polar and Arctic Lows. A. Deepak Publishing, Hampton, VA., 1989, 420pp.
- [43] Rasmussen E A, Purdom J F W. Investigation of a polar low using geostationary satellite data[C]//6th Conf on Sat Meteor and Oceanog, Jan 5-10, Atlanta, GA, Amer Meteor Soc, Boston, 1992: 120-122.
- [44] Weiss C E, Purdom J F W. The effect of early morning cloud cover on afternoon thunderstorm activity[J]. *Mon Wea Rev*, 1974, 102: 400-401.
- [45] Purdom J F W, Gurka J G. The effect of early morning cloud cover on afternoon understorm development[C]//5th Conf. on Wea Fcst and Analysis, St Louis, Mo, Amer Meteor Soc, Boston, 1974, 58-60.
- [46] Segal M, Purdom J F W, Song J L, et al. Evaluation of cloud shading effects on the generation and modification of mesoscale circulations[J]. *Mon Wea Rev*, 1986, 114(7): 1201-1212.
- [47] Gurka J J. The role of inward mixing in the dissipation of fog and stratus[J]. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 1633-1635.
- [48] Eyre J R. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer Imagery (AVHRR)[J]. *Meteorological Magazine*, 1984, 113: 266-271.
- [49] Ellrod G. Potential applications of GOES-I 3.9 μm infrared imagery[C]//6th Conf. on Sat. Meteor. and Oceanog., Atlanta, January 5-10, Amer Meteor Soc, Boston, 1992: 184-187.
- [50] Velden C S. Satellite observations of Hurricane Elena using the VAS 6.7 micron water vapor channel[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1987, 68: 210-215.
- [51] Weldon R B, Holmes S J. Water Vapor Imagery[R]. NOAA Tech Rep NESDIS 57, US Department of Commerce, NOAA, NESDIS, Washington, D. C. 1991: 213.
- [52] Li J, Liu H. Improved hurricane track and intensity forecast using single field-of-view advanced IR sounding measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L11813, doi: 10.1029/2009GL038285.
- [53] Liu H, Li J. An improved in forecasting rapid intensification of Typhoon Sinlaku (2008) using clear-sky full spatial resolution advanced IR soundings[J]. *J Appl Meteorol and Cli*, 2010, 49: 821-827.
- [54] Fujita T T. Infrared, stereo, cloud motion, and radar-echo analysis of SESAME-day thunderstorms[C]//12th Conf on Severe Local Storms, Jan 11-15, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 1982, 213-216.
- [55] Shenk W E, Kreins E R. The NASA severe storm research program[C]//9th Conf. on severe local storms, Norman, OK, Amer Meteor Soc, Boston, 1975, 468-473.
- [56] Purdom J F W. Integration of research aircraft data and 3 minute interval GOES data to study the genesis and development of deep convective storms[C]//Preprints, 12th Conference on Severe Local Storms, 11-15 January, San Antonio, TX, Amer Meteor Soc, 1982, 269-271.
- [57] Hasler A F. Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1981, 62: 194-212.
- [58] Bristor C L, Pichel W. Three-D cloud viewing using overlapping pictures from two geostationary satellites[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1974, 55: 1353-1355.
- [59] Adler R F, Fenn D D. Thunderstorm intensity as determined from satellite data[J]. *J Appl Meteor*, 1979, 18: 502-517.
- [60] Shenk W E, Mosher F. Suggested severe local storm operational scenarios for GOES-I/M[R]. NASA TM 100688, NASA, Washington, D. C. 1987.
- [61] Shenk W E. Cloud motion derived winds: their accuracy, coverage, and suggestions for future improvements [C] // NASA Symposium on Global Wind Measurements, July 29-Aug 1, Columbia, MD, NASA, 1985, 123-128.
- [62] Shenk W E, Vonder Haar T H, Smith W L. An evaluation of observations from satellites for the study and prediction of mesoscale events and cyclone events[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1987, 68: 21-35.
- [63] Purdom J F W. Observations of thunderstorms and hurricanes using one-minute interval GOES-8 imagery[C]. Abstracts, Week B, International Union of Geodesy and Geophysics, XXI General Assembly, Boulder, CO, July 2-14, 1995.
- [64] 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[J]. *大气科学*, 1979, 3(3): 239-246.
- [65] 吕达仁,王普才,邱金桓,等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 552-565.
- [66] Fang Zongy. The preliminary study of medium-scale cloud clusters over the Chang jiang Basin in summer[J]. *Adv Atmos Sci*, 1985, 2(3): 334-340.
- [67] Bai Jie, Wang Hongqing, Tao Zuyu. The recognition and tracking of severe connective cloud from IR images of GMS[J]. *J Tropical Meteor*, 1997, 3(1): 192-201.
- [68] Tao Zuyu, Wang Hongqing, BaiJie, et al. A case of me-

- mesoscale convective complex evolving into a vortex[J]. *Acta Meteor Sin*, 1995, 9(2):184-189.
- [69] 江吉喜, 叶惠明, 陈美珍. 华南地区中尺度对流性云团[J]. *应用气象学报*, 1990, 1(3):232-241.
- [70] Qin Danyu, Jiang Jixi, Ma Lan, et al. Mesoscale convective systems during 20-23 June 2002 revealed by satellite observation[J]. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 18(1):1-16.
- [71] 张文建, 许健民, 方宗义, 等. 卫星遥感参数在暴雨两个例分析中的综合应用//暴雨系统的卫星遥感理论和方法[M]. 北京:气象出版社, 2004, 243-291.
- [72] Wu Rongzhang, A Weinman James, Roland T • Chin. Determination of rainfall rates from GOES Satellite images by a pattern recognition technique[J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 1985, 2.
- [73] 王立志, 李俊, 周凤仙. GMS-5 四通道云图的自动分类及其在定量降水估算中的应用[J]. *大气科学*, 1998, 22(3):371-378.
- [74] Lu Naimeng, Wu Rongzhang. A Convective Rainfall Estimate Technique Developed by NSMC of China[J]. *Acta Meteor Sin*, 2000, 14(2): 225-232.
- [75] 郁凡. 多光谱卫星图像降水强度场的分析[J]. *应用气象报*, 2004, 6(3):34-34.
- [76] 方宗义, 周连翔. 用地球同步气象卫星红外云图估计热带气旋的强度[J]. *气象学报*, 1980, 38(2):150-159.
- [77] 方宗义. 台风发生发展过程中的云型特征与高空环境流场的关系[J]. *大气科学*, 1982, 6(3):96-104.
- [78] 江吉喜. 增强显示红外卫星云图在热带气旋分析中的应用[J]. *气象学报*, 1986, 44(4).
- [79] 方翔, 许健民, 张其松. 高密度云导风资料所揭示的发展和不同热带气旋的对流层上部环流特征[J]. *热带气象学报*, 2000, 16(3):218-224.
- [80] 丁伟钰, 陈子通. 利用 TRMM 资料分析 2002 年登陆广东的热带气旋降水分布特征[J]. *应用气象学报*, 2004, 5(4):436-444.
- [81] Smith W L, Bishop W P, Dvorak V F, et al. The meteorological satellite: Overview of 25 years of operation[J]. *Science*, 1986, 231: 455-462.
- [82] Eyre J R, Lore A C. Direct use of satellite Sounding Radiances in NWP[J]. *Meteor Magaz*, 1989, 118:13-16.
- [83] 毛建平, 王宗皓. 卫星探测资料对数值天气分析和预报影响的个例试验[J]. *应用气象学报*, 1991, 62(1):74-82.
- [84] 王宗皓, 毛建平, 黄继红, 等. NOAA 卫星探测数据对 B-模式分析预报系统性误差的影响[J]. *气象学报*, 1993, 51(1):21-33.
- [85] 翁永辉, 徐祥德. TOVS 资料的变分处理方法在青藏高原地区的数值试验[J]. *大气科学*, 1999, 23(6):703-712.
- [86] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 卫星亮温资料四维同化方案及其对“7.20”武汉特大暴雨的模拟试验[J]. *大气科学*, 2002, 26(5):663-677.
- [87] 马刚, 方宗义, 张凤英. 云参数对 RTTOV5 模式模拟误差的影响分析[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(4):385-392.
- [88] Ma Gang, Fang Zongyi, Zhang Fengying. An error analysis of the simulated data of TOVS HIRS by RTTOVS Model[J]. *Acta Meteor Sinica*, 2002, 16(2):225-241.
- [89] 张华. ATOVS 辐射率资料的直接同化方法及应用研究. 兰州大学资源环境学院大气科学系, 2003 博士论文.
- [90] Zhu Guofu, Xue Jishan, Zhang Hua, et al. Direct assimilation of satellite radiance data in GRAPES variational assimilation system[J]. *Chinese Sci Bull*, 2008, 53:3465-3469.
- [91] 刘志权, 张凤英, 吴雪宝, 等. 区域极轨卫星 ATOVS 辐射偏差订正方法研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(1):113-123.
- [92] 顾松强, 王振会, 翁福忠, 等. 利用 NOAA/AMSU 资料和 GRAPES 同化, 系统对陆地比辐射率计算的改进研究[J]. *高原气象*, 2006, 25(6):1101-1106.
- [93] Han Wei, Xue Jishan, Xu Jianmin, et al. Assimilation of FY2C AMVs in GRAPES[C]. Eighth International Winds Workshop, 24-28 April 2006, Beijing, China.
- [94] 薛纪善. 气象卫星资料同化的科学问题与前景[J]. *气象学报*, 2009, 67(6):902-911.
- [95] Lu Qifeng, Bill Bell, Peterbauer, Niels Bormann. Assessment of FY-3A satellite data[J]. *ECMWF Newsletter*, 2009, 122: 18-20.
- [96] 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[J]. *气象*, 2011, 37(9):1151-1157.
- [97] European Space Agency. GOME Global Ozone Measuring Experiment Users Manual[R]. ESA SP-1182, ESA/ESTEC, 1995, Noordwijk.
- [98] Bovensmann H, et al. SCIAMACHY—Mission objectives and measurement modes[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 127-150.
- [99] Levelt P F, Noordhoek R. OMI Algorithm Theoretical Basis Document; Volume I: OMI Instrument, Level 0-1b processor, Calibration & Operations ATBD-OMI-01[C]. Version 1. 1, August 2002.
- [100] Fishman J, Wozniak A E, Creilson J K. Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution[J]. *Atmos Chem Phys*, 2003, 3: 893-907.
- [101] Li J, Li Z, Jin X, et al. Land surface emissivity from high temporal resolution geostationary infrared imager radiances: Methodology and simulation studies[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2011, 116: D01304, doi:10.1029/2010JD014637.
- [102] Li J, Liu C Y, Huang H L, et al. Optimal cloud-clearing for AIRS radiances using MODIS[J]. *IEEE Trans On Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43: 1266-1278.