

# 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展<sup>\*</sup>

方宗义 许健民 赵凤生

(国家卫星气象中心, 北京, 100081)

## 摘 要

气象卫星和卫星气象是大气科学中发展最迅速、成就最显著的一项大气探测技术和新兴的分支学科。目前, 气象卫星已经成为地球大气探测系统中的主要成员, 而卫星气象学则正在覆盖地球系统科学中的主要方面。文中从 3 个方面综述自 20 世纪 70 年代以来的 30 多年时间内, 中国在这一领域内取得的主要成就: (1) 中国气象卫星的发展历史和现状, 重点介绍了中国的极轨和地球静止气象卫星的发射、运行状况和主要技术指标及发展史。(2) 气象卫星遥感原理和方法等方面的主要成果, 重点评述了大气温湿廓线遥感反演、云特性反演、气溶胶特性反演、降水反演和云迹风生成等 5 个方面的主要成果。(3) 气象卫星资料应用研究成果, 主要包括气象卫星资料在天气分析和预报中的应用、在数值预报中的应用和在气候监测和短期气候预测中的应用。此外还包括同化和气候监测与预测研究的最新成果。

关键词: 气象卫星, 卫星气象学, 卫星资料应用, 反演方法。

## 1 中国气象卫星发展的历史

1969 年 1 月下旬, 受强冷空气袭击, 中国长江、黄河流域出现了严重的冰凌, 致使华东、中南地区大范围有线通讯中断。此次气象事件后, 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。”

气象卫星系统工程由五大系统组成。卫星星体和运载火箭两大系统由航天工业总公司负责, 其中卫星的主要观测仪器——扫描辐射仪由中国科学院负责研制。发射场地和测量控制两大系统由太原、西昌卫星发射基地和西安卫星测控中心分别负责。地面系统由中国气象局负责建设和运行。中国气象局并负责提出气象卫星的任务和各项技术指标。

1977 年中国第 1 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, 兼容接收和处理“风云一号”和美国 NOAA 卫星的资料。1988 年 9 月 7 日“风云一号”第 1 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 4 颗, 其主要遥感观测仪器是多通道可见光和红外扫描辐射仪。

“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”和“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“FY-1C”卫星工作寿命超过了设计要求。2002 年 5 月 15 日发射的“FY-1D”卫星目前正处于业务运行状态。图 1(见封三)是“FY-1C”卫星获取的北半球可见光图像。

1986 年中国第 1 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, 但是第 1 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 2 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”。“风云二号”系列气象卫星至今共成功发射 2 颗, 其主要遥感观测仪器也是多通道可见光和红外扫描辐射仪。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。但是“FY-2B”卫星

<sup>\*</sup> 初稿时间: 2004 年 9 月 20 日; 修改稿时间: 2004 年 10 月 6 日。  
资助课题: 国家自然科学基金(40271079)。

出现了下行信道信噪比降低和扫描辐射仪在观测南半球时,运动部件摩擦力增加等问题。现在,在每年的春分日和秋分日前后各 45 d 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,图像可以使用。图 2(见封三)是“FY-2B”卫星获取的多通道合成图像。“FY-2B”卫星虽然是 1 颗有故障的卫星,但是它在中国气象卫星发展的历史上起了重要的作用。研制部门对卫星和扫描辐射仪出现的问题进行了认真的分析研究,为今后卫星和有效荷载可靠性的提高积累了经验。地面系统利用卫星发下的观测数据改进了定量处理算法,解决了数据处理中重要的关键技术,提高了数据定量处理的水平和运行的可靠性。2003 和 2004 年汛期,在日本 GMS-5 气象卫星停止工作的情况下,“FY-2B”卫星为中国广大台站和国际用户提供了有效的云图服务。至今,“FY-2B”卫星的实际服务时间已经超过卫星的设计寿命。

## 2 中国气象卫星现状

### 2.1 “风云一号”极地轨道气象卫星现状

“FY-1D”卫星的轨道特征如表 1 所示。

表 1 “FY-1D”卫星的轨道特征

Table 1 Orbit characteristics of FY-1D

| 轨道类型   | 高度     | 倾角    | 偏心率    | 升交点     |
|--------|--------|-------|--------|---------|
| 太阳同步轨道 | 866 km | 98.80 | < 0.05 | 8:20 am |

“FY-1D”卫星有 10 个观测通道,星下点水平分辨率为 1.1 km。它们的波谱位置见表 2。

“FY-1D”卫星的数据服务有两种方式:高分辨率实时数据传输和延时数据传输。实时数据传输以 1.3308 Mbps 的速率向用户实时播送 10 个通道的观测数据。延时数据传输在卫星离开地面系统接收范围时,将观测数据在星上暂时储存,在卫星下一次通过地面系统接收范围时回放。“FY-1D”卫星上安装的记录存储器可以存储 4 个通道(0.58~0.68  $\mu\text{m}$ , 0.84~89  $\mu\text{m}$ , 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ , 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ ) 3.3 km 水平分辨率的全球数据,以及局部地区 10 个通道 1.1 km 水平分辨率的数据。

“风云一号”极地轨道气象卫星的地面系统由北京、广州、乌鲁木齐 3 个气象卫星地面站和北京数据

处理中心组成。3 个地面站接收的数据通过地面通信网络实时传递到北京。北京数据处理中心将数据处理后,形成图像和产品,通过 9210 系统和地面通信网络分发。

表 2 “FY-1D”卫星多通道可见光红外扫描辐射仪的观测通道波谱位置和主要用途

Table 2 Spectral band specification of scan radiometer on board FY-1D

| 通道 | 波谱位置( $\mu\text{m}$ ) | 主要用途          |
|----|-----------------------|---------------|
| 1  | 0.85~0.68             | 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 | 0.9~0.965             | 水汽            |

### 2.2 “风云二号”静止轨道气象卫星现状

“FY-2B”卫星是自旋稳定的静止气象卫星,定点在 105°E 赤道上空。“FY-2B”卫星的多通道可见光红外扫描辐射仪有 3 个观测通道,它们的波谱位置和水平分辨率见表 3。

表 3 “FY-2B”卫星多通道可见光红外扫描辐射仪的观测通道波谱位置和水平分辨率

Table 3 Spectral band specification of scan radiometer on board FY-2B

| 通道  | 波谱位置( $\mu\text{m}$ ) | 星下点水平分辨率(km) |
|-----|-----------------------|--------------|
| 可见光 | 0.50~1.05             | 1.25         |
| 红外  | 10.5~12.5             | 5            |
| 水汽  | 6.3~7.6               | 5            |

除了观测以外,“风云二号”静止轨道气象卫星还承担展宽图像转发、低分辨率图像广播、数据搜集平台数据中继、空间环境监测任务。

“风云二号”静止轨道气象卫星的地面系统由数据和指令接收站(CDAS)、运行控制中心(SOCC)、数据处理中心(DPC)、计算机网络及存档系统(CNAS)、应用服务中心(ASC)、用户利用站(USS)组成。CDAS 是“风云二号”卫星资料接收与业务测控的主站,是卫星与地面系统的接口和界面。SOCC

是卫星和地面全系统的指挥和控制中心,负责卫星和整个地面系统的业务调度和管理。DPC 将卫星观测数据处理生成各种图像和产品。CNAS 由含计算机、网络、存储设备和软件组成,是地面系统中 SOCC、DPC、ASC 的基本运行支撑平台。ASC 生成人机交互产品,将各种气象卫星观测数据和定量产品综合加工成信息,并进行“风云二号”产品的示范应用工作。USS 分布在全国各地,使台站可以接收和利用“风云二号”气象卫星的观测数据和产品。

“风云二号”气象卫星是通过卫星和地面系统协同工作完成对地观测任务的。“风云二号”气象卫星的星载多通道扫描辐射计利用卫星自旋和它的光学镜筒步进,实现对地球的两维扫描。扫描仪每一瞬间只从聚焦位置上获取一个数据。地面系统把组成一幅云图的各条扫描线准确地拼接成一幅地球影像图,并且在图像上叠加地理经纬度网格。

### 3 中国气象卫星遥感理论和方法研究回顾与展望

1960 年 4 月 1 日,美国成功发射了世界第 1 颗气象试验卫星 TIROS-1,开创了大气探测的新纪元。此后,人们广泛开展了利用卫星观测资料反演温度、湿度和云等大气参数的理论和方法研究。中国自 20 世纪 70 年代起对卫星遥感的理论和方法研究非常重视,在大气温度廓线、云特性、气溶胶和降水的反演理论和方法以及云迹风等研究领域取得了很大的进展。

#### 3.1 大气温度廓线反演

准确获取大气温度和湿度的初始场是提高数值天气预报准确性的前提和必要条件。由于地面观测受到空间和时间分辨率的限制,近几十年来人们一直十分注重发展卫星遥感大气温度、湿廓线技术。自 Kaplan<sup>[1]</sup>首次提出利用卫星遥感大气温度廓线以后,大气遥感理论和反演方法研究受到人们的广泛关注。

早在 20 世纪 70 年代,曾庆存<sup>[2,3]</sup>就系统地阐述了大气红外遥感的原理和方法,论证了两类典型问题——大气温度和大气成分的垂直分布遥感,以及两类最基本的扫描方式——频谱法和扫描法所对应的遥感方程的适定性问题,指出测温问题所满足的第一类弗雷德和蒙积分方程的解不是唯一的,若

要有实际意义的解,需要应用其他已知的知识,对方程的解加以限制。在卫星遥感问题中,通道选择和反演方法是遥感理论及其应用的核心问题。为此,曾庆存提出了“最佳信息层”概念,这一概念对于选择遥感通道具有指导性意义。在深入探讨遥感理论的基础上,曾庆存将反演方法归纳为 2 类:一类是统计法;一类是物理反演方法(包括迭代法和最优平滑解方法)。统计法需要有足够的统计资料。在缺乏足够的统计资料,且有足够多通道可供选择的情况下可以采用物理反演方法。

80 年代以后,国家卫星气象中心结合业务需求,开展了大量的大气温度廓线反演的研究工作。黎光清等<sup>[4,5]</sup>根据大气温度遥测方程的非适定性,讨论了温度廓线估计方法的选择问题,提出了一个有偏估计调整算法。黎光清和董超华<sup>[6]</sup>使用 NOAA-7 观测资料,估计了核函数误差对大气温度廓线反演精度的影响,指出核函数误差主要以系统偏差的形式传入估计解中,从而导致强烈的不稳定解。吴保锁等<sup>[7]</sup>采用 Smith 和 Woolf<sup>[8]</sup>提出的同步物理反演方法进行了反演试验,并探讨了温度廓线的初估值对反演精度的影响。黎光清等<sup>[9]</sup>对同步物理反演方法进行了深入的研究,指出同步物理反演方法对初估值的依赖性比统计回归法弱。尽管就大范围纬向平均而论,同步物理反演方法尚不及改进的统计回归法,但在探空资料稀少的地区,同步物理反演方法的反演结果略优于统计回归法。黎光清等<sup>[10]</sup>在深入研究同步物理反演方法的基础上,对反演模式的自恰性、通道选择和初估场等方面做了改进,建立了一个改进的同步物理反演方法。黎光清等<sup>[11]</sup>对比了同步物理反演方法和改进的同步物理反演方法,指出除高层外,几乎在所有高度上改进后的同步物理反演方法的反演精度都高于同步物理反演方法。为了进一步减小初估值对反演精度的影响,张凤英等<sup>[12]</sup>利用国家气象中心的数值天气预报的 6 h 预报场作为同步物理反演的初估场。

应该指出,传统的用于探测大气温度、湿廓线的星载红外探测器(如 TOVS 或 ATOVS 中的 HIRS 仪器)采用的是滤光片分光技术。虽然此类仪器在提高天气预报水平中已经发挥了重要作用,但由于其光谱分辨率低,采用基于滤光片分光技术的探测仪器很难进一步提高探测精度和垂直分辨率以满足

数值天气预报进一步改进和发展的需求。为此, 美国 and 欧洲近年来启动了一系列高光谱分辨率大气探测仪器的研制计划。例如, 美国计划近期在 NASA 的静止试验卫星 EO-3 上搭载高光谱红外大气探测仪 GIFTS (Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer)。GIFTS 的观测和运行结果, 还将用于确定和研制高分辨率大气探测仪器 ABS (Advanced Baseline Sounder)/HES (Hyperspectral Environmental Sensor), 并搭载于计划在 2010 年以后发射的 NOAA 静止业务卫星 GOES-R 上。另外, 美国 and 欧洲还分别计划在 2010 年以前, 在极轨卫星上搭载跨轨红外探测仪 (Cross-track Infrared Sounder, CrIS) 以及干涉式红外大气探测仪 (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)。中国对发展此类探测技术也十分重视。在 20 世纪 90 年代初, 国家卫星气象中心就开始调研高光谱分辨率大气探测原理和技术实施途径。在充分调研的基础上, 提出了发展中国干涉式大气垂直探测仪的应用需求。中国未来的风云三号 and 风云四号都将搭载干涉式红外大气探测仪。如何利用这些高光谱分辨率探测资料得到可靠的大气温度和湿度廓线是未来中国大气反演理论和方法研究领域中的一个非常重要的研究课题。

### 3.2 云特性反演

近 20 a 来, 数值天气预报方法得到了迅速发展。由于数值天气预报通过数值求解控制大气运动的基本方程组来预报未来的天气形势、天气现象和气象要素值, 因此具有其他预报方法难以比拟的优点。影响数值天气预报准确性的因素很多, 其中一个最重要的因素就是人们对云特性尚缺乏足够的了解。这一问题事实上已经成为数值天气预报发展所迫切需要解决的问题。因此, 近年来云特性的研究受到人们的广泛关注。

云特性参数包括云量、云的类型、热力学相态、云顶温度、含水量、云滴有效半径和云场中相对湿度垂直分布等。由于云参数具有较强的时空变化特性, 卫星遥感将成为云特性观测研究的主要技术手段。近几十年来, 国内学者广泛开展了云检测、分类、云光学厚度、含水量、云滴有效半径等云特性参数的卫星遥感研究。

当天空中有云层存在时, 云在可见光波段具有

较大的反射率。另一方面, 云顶温度通常低于地表温度, 有云存在时向外层空间的热辐射小于无云时的向外热辐射。基于上述事实, 人们发展了多种利用卫星资料检测云量的方法。白慧卿等<sup>[13]</sup>建立了云系识别的人工神经网络法; 师春香等<sup>[14]</sup>采用多阈值和人工神经网络法对 GMS 红外云图进行自动分割试验; 方宗义<sup>[15]</sup>设计了一种适用于东亚和热带海洋地区的云参数处理方法; 刘希等<sup>[16]</sup>建立了一种云检测的动态阈值法, 该方法采用直方图曲线斜率变化最大位置对应的卫星测值作为云判识的阈值, 取得了较好的云检测结果, 目前该方法已经用于生成“风云二号”卫星的云检测产品。在云特性的卫星遥研究中, 通常将云分为高、中和低云。许健民<sup>[17]</sup>等提出了一种结合红外和水汽通道确定高、中和低云的方法。该方法已经成功地应用于生成“风云二号”卫星的云迹风产品。卫星遥感云的光学厚度和云滴有效半径的基本原理是在可见光波段, 云的反射函数主要依赖于云的光学厚度; 在近红外波段和中红外波段, 云的反射函数主要依赖于云滴有效半径。刘健等<sup>[18]</sup>定性地分析了云图与云的微物理特性的关系。赵凤生等<sup>[19]</sup>提出了一个利用 AVHRR 观测资料反演云光学厚度和云滴有效半径的迭代方法。对反演误差的数值分析结果表明, 反演精度与云光学厚度和云滴有效半径的大小有关。对于 5% 踮测量误差而言, 大部分情况下层积云光学厚度的反演误差小于 10%, 云滴有效半径的反演误差大约为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

云特性的卫星遥感是一个长期的研究课题。夜间或逆温情况下的低云检测、云分类和相态的识别以及如何准确描述云的形态和非球型冰晶粒子的辐射效应等问题至今还没有得到很好的解决。

### 3.3 气溶胶特性的反演

由于气溶胶具有较强的时空变化特性, 卫星遥感已经成为了解气溶胶时空分布的必要手段。80 年代中期, 赵柏林等<sup>[20]</sup>利用 AVHRR 资料, 进行了海上气溶胶遥感的试验。周明煜等<sup>[21]</sup>利用 AVHRR 资料分析了沙尘暴特性。赵凤生等<sup>[22]</sup>提出了一种利用水色卫星资料同时反演气溶胶光学厚度、Junge 谱值数和离水反射率的方法。李正强和赵凤生<sup>[23]</sup>利用 GMS 资料反演了中国东海上气溶胶光学厚度。为了减小由于实际大气中谱分布不确定

性所造成的气溶胶光学厚度的反演误差, 赵凤生等<sup>[24]</sup>通过数值试验说明了对于卫星遥感而言, 如果同时反演气溶胶光学厚度和 Junge 谱指数, 利用 Junge 谱分布近似实际大气中通常观测到的双模谱所造成的误差仅为百分之几。该研究基本上解决了卫星遥感气溶胶研究中的气溶胶谱分布不确定性的影响问题。在此基础上, 他们提出了一种同时反演气溶胶光学厚度和 Junge 谱指数的迭代方法。通过和地面观测结果对比, 说明了迭代方法具有较高的精度。

陆地上气溶胶光学厚度的卫星遥感仍然是一个困难的课题。目前中国学者大都采用 MODIS 暗目标方法。该方法的精度会受到地表反射率和气溶胶光学特性(如单次散射反照率)的不确定性的影响。

### 3.4 降水的卫星遥感研究

被动遥感降水的方法分为可见光与红外降水估计方法和微波降水反演方法。由于卫星观测的可见光和红外光谱信号主要包含的是云顶信息, 微波遥感降水日益受到人们的重视。吴蓉璋和 Weirman<sup>[25]</sup>模拟了 SSM/I 高频和低频通道对降水的敏感性, 指出高频通道对云顶部冰晶粒子浓度敏感, 低频通道对云底部水滴浓度比较敏感。这一研究成果为发展微波降水反演方法奠定了基础。卞建春等<sup>[26]</sup>将神经网络法用于反演降水。吕达仁等<sup>[27]</sup>开发了用于降水估计的综合统计算法。傅云飞等<sup>[28]</sup>利用 TRMM 卫星的测雨雷达和微波成像仪探测结果, 研究了降水系统的水平和垂直结构, 以及 TMI 微波亮温对降水强弱和分布的响应。吴庆梅等<sup>[29]</sup>探讨了中国江淮、华南降水的微波特性, 研究了散射指数与降水的相关特征, 并开展了初步的雨强反演研究。

### 3.5 云迹风

用静止气象卫星的图像估算风场, 其主要任务是准确地追踪示踪云的位移, 以及准确地指定示踪云中图像特征的高度。中国的卫星云导风研究工作起步于 80 年代。国家卫星气象中心、中国气象科学研究院、北京大学、南京气象学院都曾有人研究过卫星云导风, 其中国家卫星气象中心许健民研究组<sup>[17~30]</sup>的研究成果投入了业务使用, 并且在国际同行中有影响和地位。许健民研究组的算法与目前国际上流行的算法相比, 在 3 个地方有进步: (1) 在示踪云识别方面, 目前各个计算中心都在搜索区内

计算相关系数全矩阵, 取其最大值追踪示踪云, 为了节减计算工作量, 搜索区取得较小, 用数值预报场作初始值。提出了简算算法, 搜索区取得较大, 不用数值预报做初值。试验计算表明, 在与搜索区全部计算结果完全等价的前提下, 这种的算法工作量节减到原来的 1/8 左右。而且这种算法只需一台微机, 还大大地提高了风的计算密度, 所得风场可描绘出辐合、辐散等细节。这种算法在 1996 年第 24 届国际气象卫星协调组织会议上被记录为重要特征; (2) 在几何方面, 目前各个计算中心都用矢量方法计算风向风速, 许健民研究组则用球面三角几何公式计算, 算法简单, 精度高; (3) 在高度估计方面, 国家卫星气象中心的算法同国外通用的算法一样也用红外和水汽两个通道的测值估计示踪云中图像特征的高度。与其他中心不同的是, 许健民研究组的算法在利用水汽通道的测值对红外通道所表征的高度进行订正之前, 首先通过考察示踪云内红外、水汽两个通道测值的分布和分裂窗测值差的极值, 以区分薄卷云和低云, 然后再对薄卷云进行高度订正, 而对低云则不进行订正。这就充分利用了原来认为高度指定不易做准确的薄卷云。利用了薄卷云后, 卫星云导风的分布大大改进。这种高度订正方法在 1998 年第 4 届国际云导风会议上被记录为重要进展。

## 4 气象卫星资料的应用研究

自 1960 年 4 月 1 日第 1 颗气象卫星上天以来, 随着技术的进步和投入的增加, 气象卫星已有业务和试验等多种类别, 极轨和地球静止业务气象卫星也经历了多次更新换代。所有这一切均使气象卫星的探测能力、应用领域和服务效益发生着巨大变化。目前, 气象卫星已经成为当代地球大气探测系统的中坚和骨干。由气象卫星获取的地球大气信息已经被广泛地应用于大气科学的各个分支学科。下面简要地评述中国卫星气象工作者利用中国和国外气象卫星资料, 在气象研究和应用服务方面取得的主要成果。

### 4.1 气象卫星在天气分析和预报中的应用

中国从 1969 年开始接收和利用国外的气象卫星资料, 在 20 世纪 70 和 80 年代, 中国卫星气象工作者利用卫星云图, 从天气学的角度, 对影响中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的研究方面工作更多、更深入; 对高空急流、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、方宗义等<sup>[31]</sup>和吕达仁、王普才<sup>[32]</sup>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。

1985 年以来, 随着气象卫星定量遥感探测能力的增强, 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。方宗义<sup>[33]</sup>分析了梅雨锋上的中尺度云团, 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。陶祖 等<sup>[34]</sup>、白洁和王洪庆等<sup>[35]</sup>在对一个中尺度对流复合体进行发展、演变分析的基础上, 提出了对他们进行识别和追踪的方法。江吉喜等<sup>[36]</sup>则对华南地区的中尺度对流性云团的特征进行了统计特征分析, 指出了云团活动的源地, 及其日变化特征。此后, 项续康和江吉喜<sup>[37]</sup>又研究了中国南方的中尺度对流复合体, 得到了 10 个中尺度对流复合体的平均生命史为 18 h, 最长 22 h, 最短 11 h, 90% 以上发生于北京时间 18~05 时, 具有显著的夜发性。江吉喜和范梅珠<sup>[38]</sup>利用逐时的 GMS 红外亮温, 计算和分析了青藏高原及其周边地区对流云和中尺度对流系统的活动、形成、发展的月际变化和地理分布; 它们的强度、日变化、移动和传播特征; 对流主要发生在高原的中南部。主要活动于下午一前半夜, 北京时 19 时为峰值, 09~13 时最弱。郑新江等<sup>[39]</sup>则继肖稳安之后对华北强对流云团的活动及其天气特征进行分析, 不仅给出了统计特征, 还指出了云团与大风的关系, 云团顶部的 TBB 分布和其移动演变过程。

1998 年中国发生了自 1954 年以来长江全流域最强的一次梅雨暴雨洪涝灾害, 不少气象人员利用气象卫星资料对这类暴雨过程进行了分析。师春香等<sup>[40]</sup>制作了 TBB 的时间-经度剖面图, 较清楚地追踪到了 3 段梅雨期中的主要降水过程及其上的中尺度云团活动, 通过逐时的卫星云图及云顶亮温分析, 指出了梅雨锋上的  $\beta$  中尺度云团在地形及环境场的影响下, 可以自东向西移动。

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示暴雨云团的特征就提上了日程。覃丹宇等<sup>[41]</sup>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。

在国家 973 计划支持下的“中国灾害性天气形成机理和预测理论研究”项目中, 利用卫星遥感手段获取暴雨信息, 研究其形成机理是其主要内容之一。在文献[42]中, 利用多种遥感信息, 从多个侧面分析了 2002, 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。不仅揭示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<sup>[43]</sup>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:  $0 \leq R < 0.5 \text{ mm/h}$ ; 1 级小雨:  $0.5 \leq R < 5.0 \text{ mm/h}$ ; 2 级强降水:  $5.0 \text{ mm/h} \leq R$ )的方法。王立志等<sup>[44]</sup>利用 GMS-5 的 4 通道云图, 发展出了自动云分类技术, 并在此基础上提出了降水估计方法。卢乃锰和吴蓉璋<sup>[45, 46]</sup>在分析中国降水云团的灰度、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<sup>[47]</sup>在分析 GMS-5 卫星多光谱传感器的光谱特性与降水的关系基础上, 发展出可以估计 6 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<sup>[48, 49]</sup>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<sup>[50]</sup>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<sup>[51]</sup>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。丁伟钰和陈子通<sup>[52]</sup>利用 TRMM 卫星得到的 3 h 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,揭示出外围降水加大,则中心附近降水减弱。

#### 4.2 气象卫星资料在数值预报中的应用

把气象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。长时期出来,由于卫星反演产品的精度不高、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。最近 10 多年,遥感探测技术的发展,数值模式初值处理技术的进步,计算机运算速度呈量级提高,更多、更好的卫星遥感观测值已经成为提高模式预报性能的主要途径。目前,美国和 ECMWF 的业务数值预报模式系统输入的观测资料中 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。

中国的气象工作者在探索如何在数值预报模式中应用卫星测值,也经历了一个较长的过程。王宗皓等<sup>[53,54]</sup>把 NOAA 卫星探测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。此后,他们把 NOAA 卫星探测数据输入 B 模式,对海平面气压场和 500 hPa 高度场预报的影响进行分析。结果表明对系统性误差均有影响,但影响的大小与地区、天气系统、季节等均有关。此后,王子厚等<sup>[55]</sup>把 HIRS/2 的辐射亮温值通过最优插值方法(OI),与其他观测资料组合在一起,形成含有卫星探测信息的初始场,对比试验表明,在数值预报模式中直接使用辐射亮温比使用反演结果好。王超等<sup>[56]</sup>进行了数值预报/卫星反演/数据同化的预报试验,结果表明,对台风中心强度预报有所影响。

在用辐射传输方程,由卫星辐射测值反演大气温度和湿度廓线的过程中,一些资料处理的误差代入了反演结果,使原本精度就不高的卫星测值就更加雪上加霜。为了克服这一问题,近年来大多采用

高分辨同化技术,直接同化卫星观测的辐射率。翁永辉和徐祥德<sup>[57]</sup>在非静力的 MM5 模式中,通过变分处理,引入 TOVS 资料,其结果表明可显著改善高原地区的初始场信息。孟智勇等<sup>[58]</sup>在 MM5 第 2 版本的模式中,采用牛顿张驰逼近(Nudging)方法,把 TOVS 的亮温资料四维同化进入模式。试验结果表明,能成功地模拟出 1998 年 7 月 20 日武汉的特大暴雨及低层中尺度低涡、低空西南急流等主要影响系统。徐祥德等<sup>[59]</sup>利用卫星 TOVS 资料,通过变分和滤波处理技术对 1998 年 7 月 20~23 日武汉—黄石的特大暴雨进行了诊断分析,揭示了大暴雨的 MCC 特征,对流系统的复合偶极子特征等。变分同化后的初始场能提取出更多的中尺度信息。潘宁等<sup>[60]</sup>采用三维增量变分同化技术把 ATOVS 资料同化进入 MM5 模式,结果表明,对流层中上部的温度场预报有较大改进,对水汽混合比预报也有正效应。

无论是三维变分同化,还是四维变分同化,作为把卫星遥感辐射测值和数值预报模式变量( $t, q, p, u, v, w$ )关联在一起的观测算子,即辐射传输方程的正演求解是一个至关重要的环节。快速辐射传输模式的模拟性能及其误差状况是必须弄清楚的问题。马刚等<sup>[61,62]</sup>研究了云参数对快速辐射传输模式(RTTOV)模拟误差的影响,弄清了云和下垫面对不同探测通道的影响大小,均方根误差随扫描角和观测角的变化,以及均方根误差与地形高度的关系。张华<sup>[63]</sup>用快速辐射传输模式 RTTOV,把 AMSU 资料同化到 T213 的初始场中,然后把同化后的三维场输入试验数值预报模式 WRF,对 2002 年 7 月 4~6 日的台风威马逊的路径预报表明,其 21 和 45 h 的预报结果均更加接近实况,由此得到的台风三维结构及其变化也更加真实。

#### 4.3 气象卫星资料在气候监测和短期气候预测中的应用

在物理气候系统中,环绕地球的五大圈层的相互作用和演变构成了气候的现状和演变。气候监测首先是对五大圈层的监测。在这方面,气象卫星的全球覆盖,高时空分辨率等特点具有独特的作用。邱康睦等<sup>[64]</sup>研究了利用 NOAA 卫星 AVHRR 资料处理生成海面温度(SST)的原理、方法和软件。在此基础上,在国家卫星气象中心形成了生成海面温

度的业务能力。肖乾广等<sup>[65]</sup>、盛永伟等<sup>[66]</sup>研究了利用 NOAA 卫星 AVHRR ch1 和 ch2 生成植被指数的原理、方法和软件,并在此基础上发展卫星遥感冬小麦估产方法和利用气象卫星植被指数进行中国植被的宏观分类方法,逐步实现了对全球生物圈的监测。冰雪通过改变地表反射率、地球系统辐射收支而影响大气环流。陈乾等<sup>[67]</sup>、刘玉洁等<sup>[68, 69]</sup>均研究了利用 NOAA 卫星 AVHRR1-3 监测中国不同地区的雪覆盖方法,绘出了雪深在不超过 20 cm 情况下的雪水当量估算方法,分析了中国三大季节性积雪区(东北、青藏高原、新疆)积雪面积的季节性和年际变化。方宗义等<sup>[70]</sup>研究了青藏高原地表反照率的计算方法,给出了 1992 年各月的平均地表反照率分布图。徐兴奎<sup>[71]</sup>采用近似的大气校正模型和双向反射模型对 AVHRR 资料进行处理,得到了长江三角洲地区地表月平均反照率值,其分布与地表覆盖特征和气候特征基本一致。陈渭民等<sup>[72]</sup>利用 GMS 卫星资料,通过与地面不同地区的净辐射测值统计相关,得到 9 种由 GMS 测值估算中国夏季辐射收支的回归模式。

利用卫星监测参数进行短期气候预测和全球变化研究的成果十分丰富,有的已在预测业务中发挥了较好的作用。自 20 世纪 80 年代以来,蒋尚诚<sup>①</sup>、<sup>[73, 74]</sup>进行了系统的利用卫星观测的射出长波辐射(OLR)资料,研究行星尺度天气系统(如 ITCZ、西太平洋副热带高压)的季节性活动特征,以及利用它进行长江流域旱涝的预测和青藏高原的雨量估计等工作,得到了很好的结果。谢安和叶谦<sup>[75]</sup>则讨论了 OLR 低频振荡与西太平洋台风活动的关系。施宁、朱盛明<sup>[76]</sup>讨论了春季热带地区 OLR 低频振荡与长江中下游连阴雨的关系。马乃孚、杨景勋<sup>[77]</sup>对

热带 OLR 异常的遥相关结构及其季节变化特征进行了研究,并给出了遥相关型。

以上简要地评述了自 1969 年以来的 35 a 中,中国气象卫星资料应用研究和业务应用方面所取得的初步成果。这里所讲的应用仅仅是指在天气分析和预报、数值预报和气候监测与预测等 3 个方面的成果。由于从事这一领域的研究人员很多,有关成果发表在许多期刊和专著上,受时间、接触面的限制,以上的评述一定会挂一漏万,特请读者谅解。关于气象卫星在沙尘暴和气溶胶的监测方法和结果,地表水体和洪涝监测,地表热源和森林、草原火灾监测以及资源环境监测等方面的成果,受篇幅和知识面的限制,在此更无法作出中肯的评述和介绍。

## 5 结 语

自 20 世纪 70 年代以来,中国对气象卫星发展和应用非常重视。目前气象卫星已有业务和试验等多种类别,极轨和地球静止卫星也经历了多次更新换代。伴随气象卫星探测能力的提高,中国卫星遥感基础理论和资料处理方法研究也取得了很大进展,有些工作在国际上已有重要影响。由气象卫星获取的地球大气信息已经广泛地应用于大气科学的许多领域,并在灾害性天气监测中发挥了重要的作用。

中国正在研发风云三号极轨卫星和风云四号地球静止卫星。这些卫星上的探测器不仅光谱分辨率有极大的提高,同时探测波段将包括紫外、可见光、红外和微波。如何利用这些探测资料反演出可靠的各种大气和环境参数,并将这些产品应用于天气分析、数值天气预报以及气候和环境等研究领域将是中国未来气象卫星应用的重要研究方向。

## 参考文献

- 1 Kaplan L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurement. J Opt Soc Amer, 1959, 49: 1004~ 1012
- 2 曾庆存. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社, 1974. 174pp
- 3 曾庆存. 大气红外遥感探测的一些理论问题. 中国科学, 1978, 5: 552~ 559
- 4 黎光清. 大气红外间接遥测方程的估计解和验前限制. 大气科学, 1984, 8(4): 339~ 410
- 5 黎光清, 董超华. 调整方法反演大气温度廓线的比较研究. 大气科学, 1986, 10(4): 419~ 425
- 6 黎光清, 董超华. 应用 Bayes 算法估计核函数误差对大气温度廓线反演的影响. 大气科学, 1988, 12(1): 36~ 41

① 蒋尚诚. 卫星观测的 OLR 气候图及其分析. 中国气象科学研究院院刊, 1988, 3(1): 93~ 99

- 7 吴保锁, 黎光清, 董超华. NOAA 极轨气象卫星大气参数的物理反演方法数值试验. 红外研究, 1990, 9(3): 233~ 241
- 8 Smith W L, Woolf H M. Conference on satellite meteorology/remote sensing and applications. 1984, 45~ 48
- 9 黎光清, 董超华, 吴保锁等. 东亚地区高分辨率物理反演方法的数值试验: 内部比较研究. 大气科学, 1991, 15(1): 84~ 93
- 10 黎光清, 张文建, 董超华. 同步物理反演方法改进试验. 中国空间科学技术, 1991, 11, 45~ 50
- 11 黎光清, 张明华, 董超华. 综合的遥感反演算法的数值试验. 应用气象学报, 1992, 3
- 12 张凤英, 王超, 冉茂农等. 一种新的 TOVS 大气湿度反演方法及试验. 应用气象学报, 1997, 8(2): 147~ 156
- 13 白慧卿, 方宗义, 吴蓉璋等. 基于人工神经网络的 GMS 云图四类云系的识别应用. 气象学报, 1998, 56(4): 402~ 409
- 14 师春香, 吴蓉璋, 项续康. 多阈值和神经网络卫星云图云系自动分割试验. 应用气象学报, 2001, 12(1): 70~ 78
- 15 方宗义, 刘玉洁, 朱小祥. 卫星云参数处理方法和 1991 年的云气候特征分析. 应用气象学报, 1994, 5(2): 135~ 142
- 16 刘希, 许健民等. 双通道动态阈值法对 GMS- 5 图像进行自动云检测. 应用气象学报, 2005, 待发表
- 17 许健民, 张其松, 方翔. 用红外和水汽两个通道的卫星测值指定云迹风的高度. 气象学报, 1997, 55(4): 408~ 417
- 18 刘健, 许健民, 方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征. 应用气象学报, 1999, 10(1): 28~ 33
- 19 赵凤生等. 利用 NOAA- AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. 气象学报, 2002, 60(5): 594~ 601
- 20 赵柏林, 俞小鼎. 海上大气气溶胶的卫星遥感研究. 科学通报, 1986, 31: 1645~ 1649
- 21 Zhao M Y, Chen Z, Hunag R, et al. Effect of two dust storms on solar radiation in the Beijing- Tianjin area. Geophys Res Lett, 1994, 21(24): 2697~ 2700
- 22 Zhao F S, Nakajima T. Simultaneous determination of water leaving reflectance and aerosol optical thickness from CZCS measurement. Appl Opt, 1997, 36: 6949~ 6956
- 23 李正强, 赵凤生. 利用静止卫星资料反演气溶胶光学厚度. 量子电子学报, 2001, 18(4): 381~ 384
- 24 Zhao F S, Li Y, Dong C H, et al. An algorithm for the determination of aerosol optical thickness from AVHRR imaginary over oceans. Meteor Atmos Phys, 2002, 80: 73~ 88
- 25 Wu R, Weinman J A. Microwave radiances from precipitating clouds containing aspherical ice, combined phase, and liquid hydrometers. J Geophys Res, 1984, 89: 7170~ 7178
- 26 Bian Jianchun, Chen Hongbin, Yang Peicai et al. Retrievals of over- ocean precipitable water from SSM/I by SOM network model. Chinese Science Bulletin, 1999, 44: 1038~ 1041
- 27 Lu Daren, Sun Jaibing, Bian Jianchun, et al. New method for retrieval of rainfall rate over ocean with SSM/I data, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment, Spie proceedings series, 1998, 3503: 102~ 107
- 28 傅云飞, 宇如聪, 徐幼平等. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究. 气象学报, 2003, 61(4): 421~ 430
- 29 吴庆梅, 程明虎, 苗春生. 用 TRMM 资料研究江淮、华南降水的微波特征. 应用气象学报, 2003, 14: 206~ 214
- 30 Xu J, Holmlund K, Zheng Q, et al. Comparison of two schemes for derivation of atmospheric motion vectors. 2002, 107(D14): ACL- 4
- 31 陶诗言, 方宗义等. 气象卫星资料在中国天气分析和预报上的应用. 大气科学, 1979, 3(3): 239~ 246
- 32 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. 大气科学, 2003, 27(4): 552~ 565
- 33 Fang Z Y. The preliminary study of medium- scale cloud clusters over the chang jiang Basin in Summer. Adv Atmos Sci, 1985, 2(3): 334~ 340
- 34 Bai Jie, Wang Hongqing, Tao Zuyu. The recognition and tracking of severe convective cloud from IR images of GMS. J Tropic Meteor, 1997, 3(1): 192~ 201
- 35 Tao Zuyu, Wang Hongqing, Bai Jie, et al. A case of mesoscale convective complex evolving into a vortex. ACTA Meteor Sinica, 1995, 9(2): 184~ 189
- 36 江吉喜, 叶惠明, 陈美珍. 华南地区中尺度对流性云团. 应用气象学报, 1990, 1(3): 232~ 240
- 37 项续康, 江吉喜. 中国南方地区的中尺度对流复合体. 应用气象学报, 1995, 6(1): 9~ 17
- 38 江吉喜, 范梅珠. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统. 大气科学, 2002, 26(2): 263~ 270
- 39 郑新江, 赵亚民. 华北强对流云团的活动及其天气特征. 应用气象学报, 1992, 3(增刊): 88~ 92
- 40 师春香, 江吉喜, 方宗义. 1998 年长江大水期间对流云团活动特征研究. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 279~ 286
- 41 Qin Danyu, Jiang Jixi, Ma Lan, et al. Mesoscale convective systems during 20- 23 June 2002 revealed by satellite observation. ACTA Meteor Sinica, 2004, 18(1): 1~ 16
- 42 张文建, 方宗义等. 卫星遥感参数在暴雨个例分析中的综合应用. 见: 张文建, 许健民, 方宗义等著. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法. 北京: 气象出版社, 2004. 243~ 291
- 43 Wu Rongzhang, James A Weinman, Roland T Chin. Determination of Rainfall Rates from GOES Satellite. Images by a Pattern Recognition Technique. J Atmos Oceanic Tech, 1985, 2: 314~ 330
- 44 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. 大气科学, 1998, 22(3): 371~ 378
- 45 卢乃锰, 吴蓉璋. 强对流降水云团的云图特征分析. 应用气象学报, 1997, 8(3): 269~ 275
- 46 Lu Naimeng, Wu Rongzhang. A Convective Rainfall Estimate Technique Developed by NSMC of china. ACTA Meteor Sinica. 2000, 14(2): 225~ 232
- 47 郁凡. 多光谱卫星图像降水强度场的分析. 气象学报, 2004, 61(3): 334~ 345
- 48 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. 气象学报, 1980, 38(2): 150~ 159

- 49 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. 大气科学, 1982, 6(3): 274~ 282
- 50 江吉喜. 增强显示红外卫星云图在热带气旋分析中的应用. 气象学报, 1986, 44(4): 482~ 487
- 51 方翔, 许健民, 张其松. 高密度云导风资料所揭示的发展和不对称热带气旋的对流层上部环流特征. 热带气象学报, 2000, 16(3): 218~ 224
- 52 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. 应用气象学报, 2004, 5(4): 436~ 444
- 53 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. 应用气象学报, 1991, 62(1): 74~ 82
- 54 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. 气象学报, 1993, 51(1): 21~ 33
- 55 王子厚, 王宗皓, 张凤英. HIRS/Z 亮温直接应用于数值预报的试验研究. 应用气象学报, 1995, 6(3): 273~ 280
- 56 王超, 万丰, 张凤英等. 数值预报/卫星反演/数据同化循环试验. 气象学报, 1997, 55(6): 740~ 749
- 57 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. 大气科学, 1999, 23(6): 703~ 712
- 58 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. 大气科学, 2002, 26(5): 663~ 677
- 59 徐祥德, 翁永辉, 孟智勇. 卫星 TOVS 资料变分分析 98. 7 武汉—黄石地区特大暴雨中尺度锋面对流特征. 大气科学, 2002, 26(6): 845~ 856
- 60 潘宁, 董超华, 张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究. 气象学报, 2003, 61(2): 226~ 236
- 61 马刚, 方宗义, 张凤英. 云参数对 RTTOVS 模式模拟误差的影响分析. 应用气象学报, 2001, 12(4): 385~ 392
- 62 Ma Gang, Fang Zongyi, Zhang Fengying. An error analysis of the simulated data of TOVS HIRS by RTTOVS Model. ACTA Meteo Sinica, 2002, 16(2): 225~ 241
- 63 张华. ATOVS 辐射率资料的直接同化方法及应用研究: [ 博士论文], 兰州大学资源环境学院. 2003
- 64 邱康睦, 王宝华, 吴晓. 气象卫星遥感海面温度的资料处理方法. 中国空间科学技术, 1992, 12(1): 63~ 69
- 65 肖乾广, 周嗣松, 陈维英等. 用气象卫星数据对冬小麦进行估产的试验. 环境遥感, 1986, 1(4): 260~ 268
- 66 盛永伟, 陈维英, 肖乾广等. 利用气象卫星植被指数进行中国植被的宏观分类. 科学通报, 1995, 40(1): 68~ 71
- 67 陈乾, 陈添宇, 陈维英等. 用 AVHRR 资料反演祁连山区积雪参量. 冰川冻土, 1990, 12(4): 281~ 292
- 68 刘玉洁, 袁秀卿, 张红. 用气象卫星资料监测积雪. 环境遥感, 1992, 7(1): 24~ 31
- 69 刘玉洁, 郑照军, 王丽波. 中国西部地区冬季雪盖遥感和变化分析. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 114~ 123
- 70 方宗义, 刘玉洁, 林曼筠. 青藏高原地表反照率计算研究. 气象学报, 1996, 54(5): 580~ 589
- 71 徐兴奎. 长江三角洲地区地表月平均反照率的卫星遥感研究. 大气科学, 2002, 26(3): 394~ 400
- 72 陈渭民, 高庆先, 洪刚. 由 GMS 卫星资料获取中国夏季地表辐射收支. 大气科学, 1997, 21(2): 238~ 246
- 73 蒋尚城. 全球 ITCZ 的气候特征研究. 气象学报, 1988b, 46(2): 241~ 245
- 74 蒋尚城, 温斯顿. 长江流域旱涝的 OLR 特征. 气象学报, 1989, 47(4): 479~ 483
- 75 谢安, 叶谦. OLR 低频振荡与西太平洋台风活动的探讨. 气象学报, 1987, 13(10): 8~ 13
- 76 施宁, 朱盛明. 春季热带地区 OLR 低频振荡及其与长江中下游连阴雨. 大气科学, 1991, 15(2): 53~ 61
- 77 马乃孚, 杨景勋. 热带 OLR 异常的遥相关结构及其季节变化. 大气科学, 1994, 18(4): 442~ 450

## PROGRESS AND PROSPECT OF CHINA METEOROLOGICAL SATELLITE AND SATELLITE METEOROLOGY

Fang Zongyi Xu jianmin Zhao Fengsheng

(*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

### Abstract

The meteorological satellite and satellite meteorology are new monitoring technology and discipline that gained quick development and great success in past decades. At present, the meteorological satellite plays the most important role in the earth-atmosphere monitoring system, whereas satellite meteorology is a very active field in the earth science. This paper reviews that the progress and achievements in the meteorological satellite developments and applications since the 70s of 20 century. (1) The history of China meteorological satellite development is introduced, with the focus being on the launch, operation and basic specifications of orbit and geostationary meteorological satellites. (2) The researches on the theory and data processing method of satellite remote sensing is reviewed, especially on the retrieval of temperature profile, cloud properties, aerosols, precipitation and cloud wind. (3) The achievement on the China satellite applications is described, including those in the weather analysis and forecast, numerical weather prediction, climate monitoring and short range climate forecast. The recent development on the meteorological satellite data assimilation is also introduced.

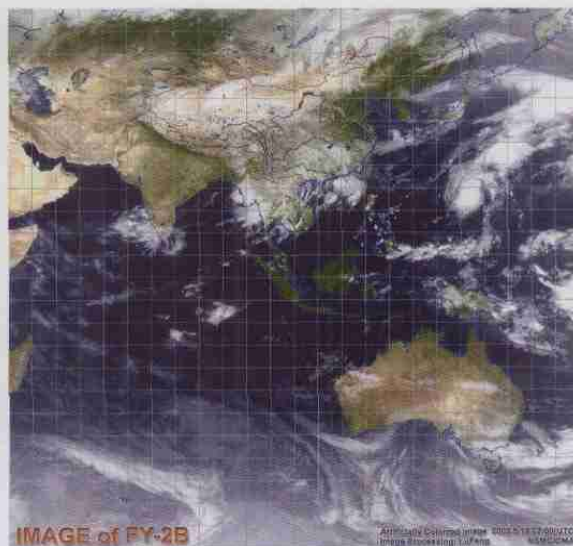
**Key words:** Meteorological satellite, Satellite meteorology, Satellite data application, Retrieval method.

## 方宗义等：中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展



图1 FY-1C卫星获取的北半球可见光图像  
Fig.1 Visibl image of FY-1C

图2 FY-2B卫星获取的多通道合成图像  
Fig.2 FY-2B multi-channel synthetic image



## 陆龙骅等：近20年来中国极地大气科学研究进展

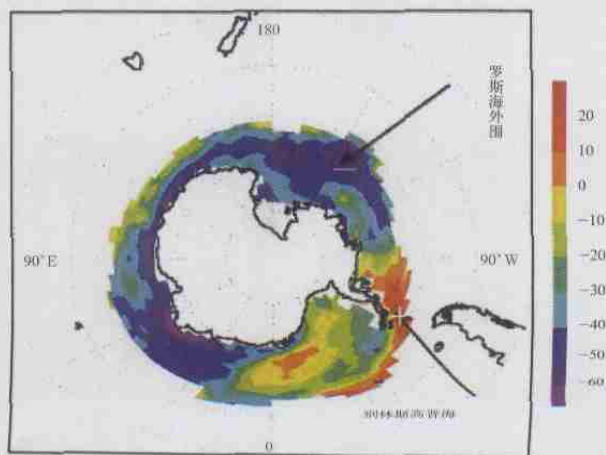


图2 南极海冰波动”(南极海冰密度EOF第一特征向量)  
Fig.2 The Antarctic sea ice oscillation(first component of EOF)