

卢乃锰,郑伟,王新,等.气象卫星及其产品在天气气候分析和环境灾害监测中的应用概述[J].海洋气象学报,2017,37(1):20-30.

Lu Naimeng, Zheng Wei, Wang Xin, et al. Overview of meteorological satellite and its data application in weather analysis, climate and environment disaster monitoring[J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(1):20-30. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.003. (in Chinese)

## 气象卫星及其产品在天气气候分析和 环境灾害监测中的应用概述

卢乃锰,郑伟,王新,高玲,刘清华,武胜利,蒋建莹,谷松岩,方翔  
(国家卫星气象中心,北京 100081)

**摘要:** 随着气象卫星技术的发展,卫星观测能力不断提升,全球气象卫星观测体系逐步形成。美国、欧洲和中国都建立了极轨和静止气象卫星观测系统,日本、韩国等国家也拥有各自的气象卫星。与卫星发展初期相比,现在的气象卫星在空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率以及波段覆盖范围等方面都有了极大的提高。与之相伴,气象卫星遥感资料应用也取得了长足的进步。卫星应用领域不断拓展,新的资料处理方法不断涌现,数据使用也完成了从定性向定量的跨越。本文将在总结目前气象卫星遥感载荷观测能力的基础上,着重介绍卫星资料在天气分析、环境灾害监测以及气候变化研究方面的应用。

**关键词:** 气象卫星; 天气分析; 环境灾害; 气候变化; 监测

**中图分类号:** P1414.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0020-11

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.003

## Overview of meteorological satellite and its data application in weather analysis, climate and environment disaster monitoring

LU Naimeng, ZHENG Wei, WANG Xin, GAO Ling, LIU Qinghua, WU Shengli,  
JIANG Jianying, GU Songyan, FANG Xiang  
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract** As the developing of space technique, the meteorological satellite and its instruments have experienced great improvement. Right now, China, Europe and United States are operating their own polar and geo-stationary meteorological satellites, and Japan, South Korea have also established national geo-stationary meteorological satellite system. Compared with its early stage, today's meteorological satellite improved enormously, especially in its spatial, temporal and spectral resolution as well as spectral coverage. Meanwhile, satellite data application has also developed tremendously, taking into account the maturity of data useness as well as the domination of the use of quantitative data. In this paper, the status of current meteorological satellite and the capacity of its payloads are reviewed, and then the application of satellite data in the field of weather analysis, climate and environment disaster monitoring is also described.

**Key words** meteorological satellite; weather analysis; environment disaster; climate change; monitoring

收稿日期:2017-03-10; 修订日期:2017-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41201360);国家重点研发计划项目(2016YFA0600101)

作者简介:卢乃锰(1963—),男,研究员,主要从事气象卫星遥感仪器、产品的设计和研究工作,lunm@ema.gov.cn。

## 引言

气象卫星的出现,改变了人类地球观测的历史。自从有了气象卫星,台风从哪里产生、如何发展、向何处移动等困扰天气预报人员的问题迎刃而解;沙尘暴源地在哪里、高原涡怎样演变、南极臭氧洞如何变化等科学问题也得到了有效的解决。气象卫星在支撑着现代天气预报的同时,也推动着地球系统科学的发展。

需求牵引与技术推动共同成就了气象卫星的辉煌。50 多年来气象卫星遥感技术突飞猛进。目前星载遥感仪器已经覆盖光学到微波的各个波段,遥感图像空间分辨率达到百米级,时间分辨率达到分钟级,同时还可以实现高光谱观测。在图像定位方面,目前无论是以 6~7 km/s 速度高速飞行的极轨气象卫星,还是在约 35 800 km 高度上进行观测的静止气象卫星,遥感图像的定位精度都达到了像元级,很好地满足了图像应用的需求,确保了图像的应用。

气象卫星图像应用经历了三个发展阶段<sup>[1]</sup>。目前气象卫星遥感应用主要集中在对台风、暴雨、寒潮等天气系统的监测,以及火情、水情、雪情等环境与灾害监测方面。与其它类型的遥感资料相比,气象卫星资料可以更有效地揭示天气系统发生、发展和消亡过程,为天气预报,特别是短时临近预报提供客观依据。而利用气象卫星不同通道的光谱信息,可以完成对比较大尺度的环境和灾害事件的高频次跟踪监测,这在一定程度上解决了其他卫星回归周期长,受云遮挡概率高的问题。

## 1 气象卫星发展概况

气象卫星分为极地轨道(简称极轨)气象卫星和静止轨道(简称静止)气象卫星。为了得到尽可能一致的太阳光照条件,极轨气象卫星往往采用太阳同步轨道,轨道高度在 800 km 左右。卫星围绕地球在南北极之间飞行。每 14 条轨道完成对地球的一次完整覆盖。考虑到红外遥感仪器可以在夜间进行观测,单颗极轨气象卫星通过每天升、降轨就可以完成对地球的 2 次覆盖。气象卫星拥有国通常会发射两颗过境时间相差 6 h 的极轨气象卫星,完成一天 4 次的对地观测,以捕捉天气系统的日变化。在世界气象组织的协调以及卫星拥有国双边合作框架推动下,不同国家的气象卫星协同观测,构成了覆盖全球的极轨气象卫星观测体系。

静止气象卫星在赤道上空以与地球自转速度相同的公转速度绕地飞行。由于其轨道高度比极轨气象卫星高 40 多倍,同样的遥感载荷,装载在静止气象卫星上,其空间分辨率就大为降低。但由于卫星相对于地球保持不动,因此,静止气象卫星能够以很高的观测频率对同一区域进行连续观测,特别适用于监测快速变化的中小尺度天气系统。目前只有美国、欧洲和中国同时拥有稳定业务化的极轨和静止气象卫星观测系统。

### 1.1 极轨气象卫星

美国在 1960 年发射了世界上第一颗极轨气象卫星。尽管它只获取了黑白图像,却有力地表明利用太空观测手段可以很好地捕捉全球云系空间分布和时间变化。此后近 30 年间,美国一直垄断着全球极轨气象卫星的观测,其他国家只能靠建设气象卫星接收站,完成对美国 NOAA 系列极轨气象卫星的数据接收、处理和应用。欧洲在 2006 年才发射了自己的第一颗极轨气象卫星。

1988 年,中国发射了极轨气象卫星风云一号 A 星。它仅装载了 5 通道扫描辐射计,卫星在轨运行 39 d。风云一号 A 星的升空拉开了中国独立自主研制遥感卫星的序幕。在风云一号 B/C/D 星之后,2008 年 5 月 27 日,中国发射了第二代极轨气象卫星风云三号 A 星,卫星载荷数量增加到 11 个,涵盖紫外、可见光、红外、微波各个波段。风云三号 A 星的发射标志着中国的极轨气象卫星已经进入世界先进行列。继风云三号 A 星后,中国又陆续发射了风云三号 B 星和 C 星。图 1 是目前在轨的风云三号全球拼图,表 1 是风云三号 C 星遥感载荷及其主要性能指标。风云极轨气象卫星在全球天气、气候、环境和灾害监测方面发挥着重要作用。

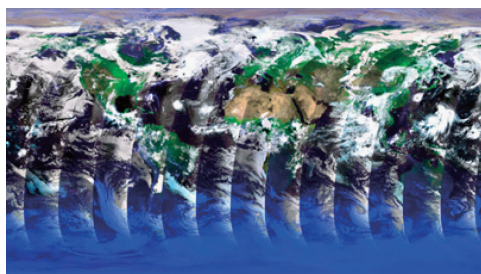


图 1 风云三号全球拼图

Fig. 1 FY-3 global mosaic picture

### 1.2 静止气象卫星

美国于 1975 年发射了静止气象卫星 GOES-1, 成为最先拥有静止气象卫星的国家。20 年之后,欧

洲气象卫星组织发射了欧洲第一颗静止气象卫星 Meteosat-1,日本也发射了它的静止气象卫星。目

表1 风云三号C星遥感载荷及其主要性能指标

Table 1 Payloads onboard FY-3C and their main parameters

载荷名称	主要参数指数	应用目的
可见光红外扫描辐射计(VIRR)	波长范围:0.43~12.5 $\mu\text{m}$ 通道数:10 空间分辨率:1.1 km	云、植被、雪和冰、地表温度、海温、水汽、气溶胶、海洋水色等
中分辨率成像光谱仪(MERSI)	波长范围:0.41~12.5 $\mu\text{m}$ 通道数:20 空间分辨率:0.25~1 km	真彩色图像、云、植被、雪和冰、海洋水色、气溶胶、火、洪涝等
微波成像仪(MWRI)	频率范围:10.65~150 GHz 通道数:12(水平和垂直极化频点各6个) 空间分辨率:15~80 km	降雨、土壤湿度、云液态水、海表参数
红外大气探测计(IRAS)	波长范围:0.69~15.5 $\mu\text{m}$ 通道数:26 空间分辨率:17.0 km 频率范围:50~57 GHz	大气温度廓线、大气湿度廓线、臭氧总量、卷云、气溶胶等
微波大气温度探测计(MWTS-II)	通道数:13 空间分辨率:50~75 km 频率范围:150~183 GHz	大气温度廓线、降水、云液态水等
微波大气湿度探测计(MWHS-II)	通道数:15 空间分辨率:15 km 采样频率:1~50 Hz	大气湿度廓线、水汽、降水、云液态水等
全球导航卫星掩星探测计(GNOS)	通道数:12+4 实时定位精度:<10 m 波长范围:309~361 nm	大气温度廓线、大气湿度廓线
臭氧总量探测计(TOU)	通道数:6 空间分辨率:50 km 波长范围:252~280 nm	臭氧总量
太阳紫外臭氧垂直探测计(SBUS)	通道数:12 空间分辨率:200 km	臭氧廓线、臭氧总量
地球辐射探测计(ERM)	波长范围:0.5~50 $\mu\text{m}$ 通道数:2	地球辐射
太阳辐射测量计(SIM)	波长范围:0.5~50 $\mu\text{m}$ 通道数:1	太阳辐射(对日定向跟踪)
空间环境探测计(SEM)	质子:3~300 MeV 电子:0.15~5.7 MeV	高能质子、高能电子、重离子

中国于1997年发射了第一颗静止气象卫星风云二号A星。之后又陆续发射了6颗风云二号系列静止气象卫星。后期的风云二号气象卫星通道扩展到5个,时间分辨率也得到提高。2016年底第二代静止气象卫星的首发星风云四号A星成功发射,星上遥感仪器扩展到4个,不仅可以对特定区域实现分钟级的成像,而且可以实现高光谱观测,完成大气温度/湿度廓线反演,为短临天气预报以及区域模式同化提供非常重要的大气参数。图2是风云四号扫描辐射计多通道彩色合成图,表2是风云

前各个国家的静止气象卫星构成了全球协同观测星座体系,实现了静止气象卫星的全球覆盖。

四号A星遥感仪器及其主要性能指标。

## 2 气象卫星技术现状

回顾历史,早期的气象卫星装载的只是可见光波段相机,下传的也是模拟信号。当时的卫星图像可以监测白天的天气系统,但却无法计算天气系统的云顶温度、云顶高度、云的微物理参数,更不能对大气的温度、湿度和风场进行反演。经历了50多年的发展,时至今日,气象卫星对天气系统的观测能力有了极大的提升,其观测资料不仅可以用于常规

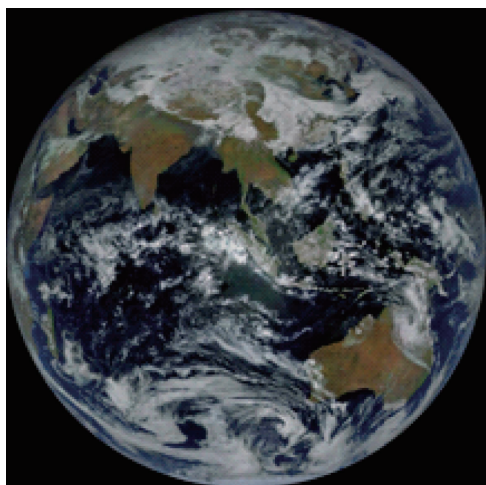


图2 风云四号A星扫描辐射计多通道彩色合成图  
Fig. 2 FY-4A multi-channel composite image

天气分析,而且可以同化到数值天气预报模式之中,成为数值天气预报的重要数据源。目前气象卫星的观测能力已经较好地满足了气象业务的基本需求。

表2 风云四号A星遥感仪器及其主要性能指标

Table 2 Payloads onboard FY-4A and their main parameters

载荷名称	主要参数指标
14 通道成像 辐射计	波段覆盖:0.45~13.8 $\mu\text{m}$
	空间分辨率:0.5~4 km
	全圆盘观测时间:15 min 观测区域:灵活可调
干涉式大气 垂直探测仪	波长范围:700~1 130 $\text{cm}^{-1}$ , 1 650~2 250 $\text{cm}^{-1}$
	光谱分辨率:0.8 $\text{cm}^{-1}$ , 1.6 $\text{cm}^{-1}$
	空间分辨率:16 km
闪电成像仪	探测波段:777.4 $\pm$ 0.5 nm
	空间分辨率:7.8 km
空间环境 监视仪器包	空间粒子探测+磁场探测

## 2.1 时间分辨能力

受火箭推进能力的制约,早期的气象卫星都是极轨卫星。与静止轨道气象卫星相比,极轨气象卫星的轨道高度低,同样角分辨率的遥感载荷装载在极轨气象卫星上可以获取更加清晰的遥感影像。然而,受到卫星回归周期的影响,单颗气象卫星每天只能过境两次,即便是两颗极轨气象卫星轨道正交排列,对于地球大部分地区而言,也只能实现每6 h一次的观测,这显然无法满足对各类天气系统的监测需求。静止气象卫星出现之后,从理论上讲,气象卫星可以完成对目标的连续观测。早期的静

止气象卫星完成对地球全圆盘扫描时间是1 h,还无法完全满足对快速变化的中小尺度天气系统的监测需求。随着卫星三轴稳定技术的成熟和电子技术的进步,现在美国、欧洲和中国的静止气象卫星可以实现小于15 min周期的全圆盘观测,对于特定区域的观测频次已经达到分钟级。这一能力完全可以满足现在天气预报的需求。

## 2.2 空间分辨能力

气象卫星对空间分辨的需求与大气科学的发展相辅相成。就光学图像的空间分辨率而言,当前卫星遥感技术的发展已经超前于天气预报的需求。鉴于对数据下传、数据处理、产品存档以及投入产出比的考虑,目前气象卫星光学成像类遥感载荷的空间分辨率大多选定在1 000~250 m,红外成像仪器的空间探测分辨率一般在千米级。随着应用需求的发展,这一指标将进一步提高。另一方面,在微波观测波段以及垂直探测谱段,尽管过去30多年载荷研制水平已经取得了很大的进步,但受到技术水平的制约,气象遥感数据的空间分辨率基本上还处在10 km量级,与应用需求还存在差距。

## 2.3 光谱分辨能力

光谱分辨能力是遥感卫星载荷性能的又一项重要指标,直接关系到遥感卫星对目标的识别与诊断能力。气象卫星以观测大气目标为主,无论是云与气溶胶还是水汽、二氧化碳等各种气体成分,都表现出各自的特征光谱。准确观测到这些大气目标的特定光谱,需要不断提高遥感仪器的光谱分辨率。从光谱分辨能力的角度讲,目前气象卫星遥感仪器可以分为两大类,一是成像遥感仪器,由于其通道带宽较宽,入瞳的光谱维能量较大,在确保有效信噪比的前提下,遥感图像的空间分辨率很高。另一类是光谱仪,它们往往具有非常窄的带宽和非常多的光谱通道,光谱分辨能力甚至与气体分子吸收的线宽相当,其观测结果可以直接用于大气温度、湿度廓线反演和各类气体成分的反演。欧洲气象卫星装载的干涉式大气垂直探测仪(IASI)通道超过8 000个,就是一个典型的超光谱探测仪器。

## 2.4 辐射测量精度

辐射测量精度同样是决定着气象卫星遥感仪器品质的重要指标。遥感仪器的辐射测量精度由仪器辐射分辨率和辐射定标精度共同决定。无论仪器灵敏度、信噪比还是等效噪声温度,实质上都是仪器辐射分辨能力的物理描述,它们体现着遥感仪器将目标信号从影像背景噪声中分离出来的能



力。所以,高的辐射分辨能力是获取目标信号的前提。然而,现代卫星遥感不仅需要目标识别出来,而且还要借助大气辐射传输理论,通过遥感数据的精确计算,得到云顶温度、云有效粒子半径、大气温度、湿度等大气参数,高的辐射定标精度是确保准确计算各类参数的必要条件。目前国际上先进的气象卫星在可见光谱段可以保证2%的辐射测量精度,在红外谱段,观测误差可以控制在0.2 K。

### 2.5 波段覆盖范围

气象卫星遥感从可见光开始,在空间技术和探测技术进步的推动下,已经形成从紫外、可见光,到红外、微波全谱段的观测能力。这种全谱段观测能力的形成使得气象卫星资料在天气分析、环境灾害监测等方面的应用能力得到极大的提高。超薄卷云的识别、云顶温度的计算、冬季高纬度天气系统的监测等只用可见光资料无法解决的问题,都随着红外云图的获取迎刃而解;云雨大气廓线的反演、云区内部微物理结构探测、台风暖心结构的识别等只用光学遥感手段而无法解决的问题,也随着微波

资料的获取得以解决。特别是全谱段遥感与高光谱观测能力的结合,为气象卫星资料的应用开拓了更广阔的空间。

## 3 天气分析

### 3.1 台风监测

海上台风的监测主要依赖气象卫星观测。利用静止气象卫星时间分辨率高的优势,可以确定台风的初生和中心位置,估算其强度和移向移速,判断其登陆时间、地点以及暴雨范围<sup>[2]</sup>(图3a)。利用极轨气象卫星的被动微波资料可以获取台风温度、湿度三维结构<sup>[3-4]</sup>,计算大风的影响半径和强降水区面积<sup>[5]</sup>(图3b)。同时,风场测量雷达(微波散射计)还可以准确获取台风之下洋面风速、风向信息<sup>[6]</sup>(图3c)。新一代静止气象卫星风云四号A星携带的干涉式大气垂直探测仪和闪电成像仪,为探测台风雷电活动以及外围环境场变化提供了新的手段。

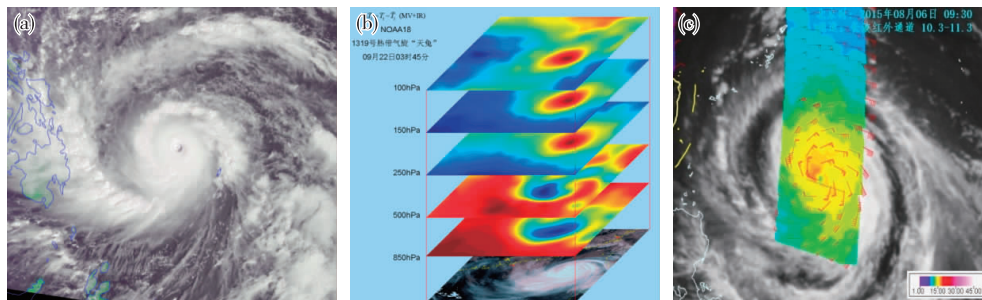


图3 卫星台风监测图像(a. 台风卫星云图, b. 卫星微波探测台风立体结构图, c. 卫星散射计反演的台风风场图)

Fig. 3 Satellite figures of tropical cyclone (TC) (a. cloud image of TC, b. TC 3D structure monitoring by microwave sounding units, c. wind field surrounding TC center monitoring by scatterometer)

### 3.2 暴雨监测

暴雨是中国最常见的自然灾害。其发生涉及到不同尺度天气系统复杂的相互作用。在卫星云图上暴雨不仅具有大范围的云系特征,而且也具有较小尺度精细结构和对流云特征。由于直接造成暴雨的主要影响系统——中尺度对流云团具有发展迅速和尺度小的特点,常规观测不足以捕捉其生命史中的变化细节及其结构,所以在监测、临近/短时预报等业务中,卫星遥感便成为十分重要的技术手段。阈值法被广泛用于暴雨云团的判识。通常认为云顶亮温 $\leq -32$  °C的云是对流云,而当云顶亮温 $\leq -52$  °C时,则认为云已穿过了对流层顶,对流发展非常旺盛,强对流天气现象也会出现。中尺度云

团的尺度范围、持续时间和形状是对中尺度云团进行分类的依据<sup>[7]</sup>。图4a-b为2015年6月1日晚湖北监利沉船事件的对流云团判识、冷区追踪分析结果。

### 3.3 沙尘暴监测

由于沙尘暴常发生在沙漠、戈壁等人迹罕至的地区,气象卫星遥感资料便成为监测沙尘暴活动的有力工具。特别是极轨气象卫星的丰富的多光谱信息,一直被中外科学家用于沙尘暴的监测。国内方宗义等<sup>[8]</sup>撰写了《中国沙尘暴研究》一书,从卫星遥感的角度诠释了对沙尘暴的分析,卢乃锰等<sup>[9]</sup>依托国家科技支撑项目“沙尘暴遥感监测与预报集成技术研究”,提出了利用静止气象卫星全波段图像

自动识别沙尘暴的方法,得到了中国沙尘暴源地分布(图 5a-b)。胡秀清等<sup>[10]</sup>集成了静止气象卫星沙尘暴监测系统。Zhang 等<sup>[11]</sup>还提出了利用 MODIS 8.5 μm、11 μm 和 12 μm 通道数据进行沙尘暴定量

遥感的算法。

这些算法集成到卫星监测分析与遥感应用系统(SMART)中,可以生成沙尘面积、沙尘频次、沙尘能见度等产品(图 6a-b)。

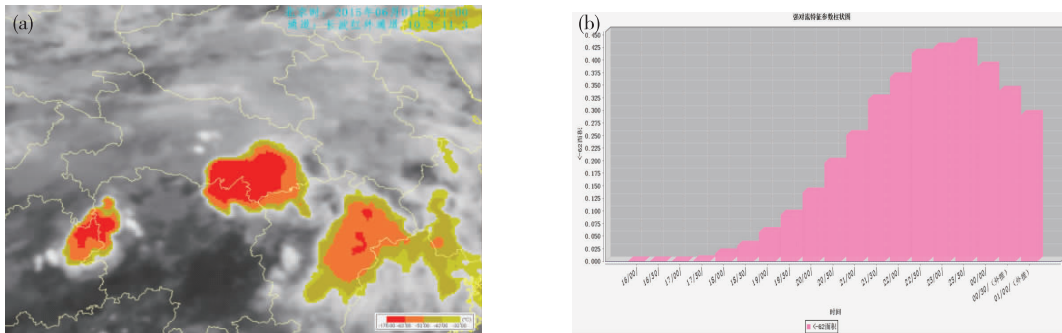


图 4 2015 年 6 月 1 日 FY-2E 气象卫星强对流判别(a)和追踪(b)结果  
Fig. 4 The identification (a) and tracing (b) results of strong convection by FY-2E on 1 June 2015

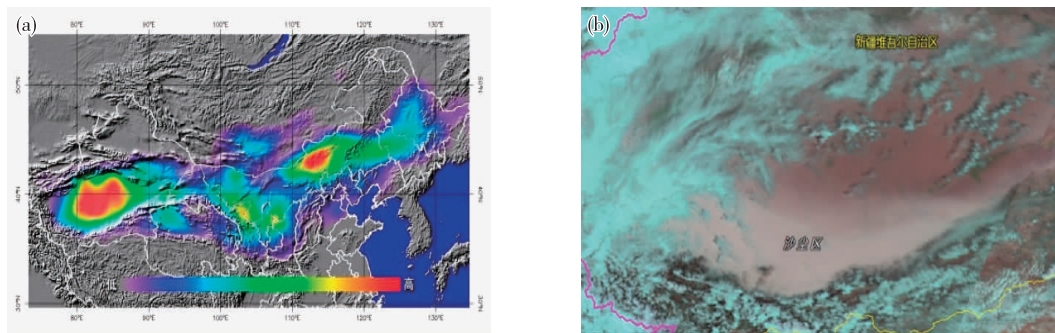


图 5 卫星沙尘暴监测图(a. 沙尘暴源地分布,色标代表发生频次,b. 2016 年 5 月 12 日新疆沙尘暴监测结果)  
Fig. 5 Dust monitoring map based on meteorological satellite (a. distribution of dust source region, color bar represents dust occurrence frequency, b. dust monitoring map in Xinjiang area on 12 May 2016)

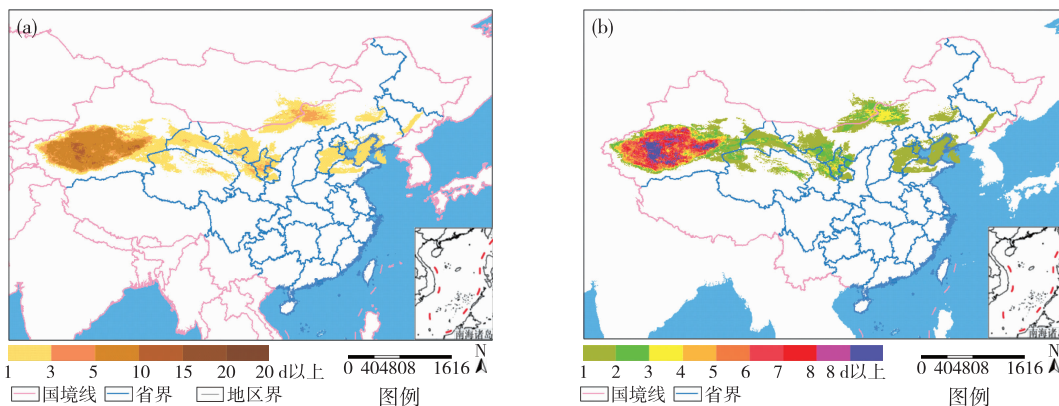


图 6 SMART 沙尘日数(a)和频次(b)产品示意图  
Fig. 6 Dust monitoring product by SMART (a. dust days,b.frequency)

### 3.4 大雾监测

大雾具有特殊的光谱和结构特性(图 7)。白天,雾在可见光波段的反射率明显高于陆地和海

表,且由于其物理温度明显高于其他中云和高云,因此,很容易将其识别出来。唯一的问题是当有低层云出现时,需要借助图像纹理等其他手段区分层



云与雾。夜间,由于雾在中红外通道的比辐射率明显小于其在长波红外通道的比辐射率,且雾滴在  $3.7 \mu\text{m}$  通道的反射率大于其他云粒子,因此,就可以利用红外通道和近红外通道观测结果判识夜间大雾。吴晓京等<sup>[12]</sup>用 Streamer 模式模拟计算各种云雾粒子在 FY-2C 成像仪通道上的辐射特性,用 AVHRR 数据结合数字高程数据(DEM)提取了新疆北部地区大雾的垂直厚度,反演了大雾区的能见度和垂直水汽含量(LWP)和雾滴有效半径,并用 FY-2B 和 GMS 卫星资料进行了中国陆地大雾消散临近预报<sup>[13]</sup>。

### 3.5 积雪监测

利用微波遥感数据,通过半经验统计算法、基于物理模型的统计算法、迭代算法、神经网络等方法<sup>[14-15]</sup>可对积雪深度、雪水当量等参数进行反演(图8a)。利用可见光、红外遥感数据,通过阈值、决

策树、查找表等方法可对积雪覆盖进行监测(图8b)。这些积雪监测产品正在为气候变化研究、农业气象服务等工作提供着科学依据和技术支撑。

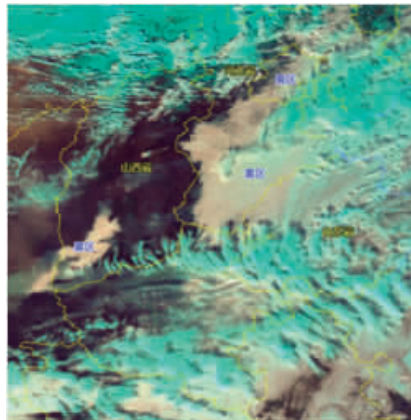


图7 FY-3B 气象卫星监测华北、黄淮大雾示意图  
Fig. 7 Fog monitoring map in North China, Huanghuai area based on FY-3B

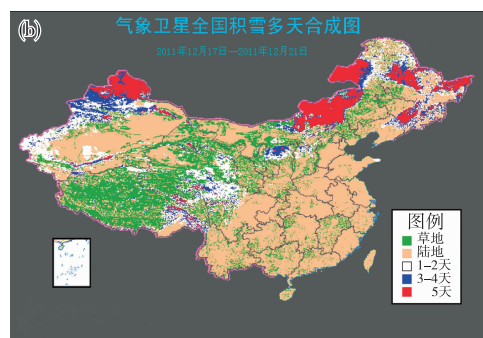
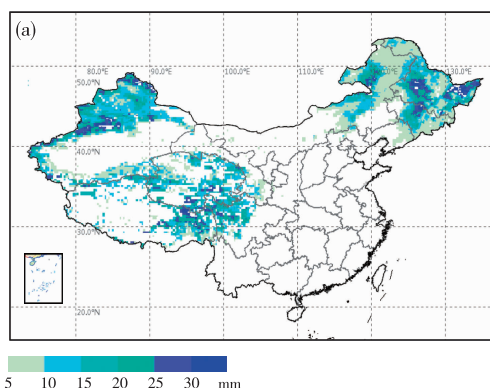


图8 积雪雪水当量(a)和积雪覆盖(b)监测产品示例  
Fig. 8 Snow water equivalent (a) and snow cover (b) products

## 4 环境灾害监测

### 4.1 卫星森林草原火灾监测

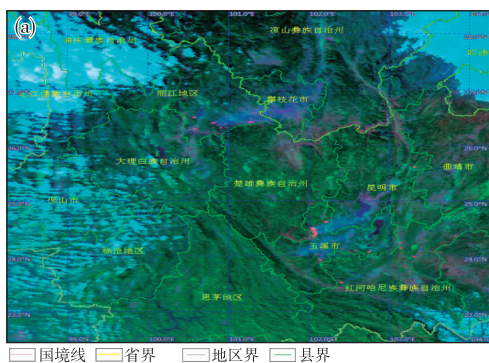
中国的草原辽阔,占到国土面积40%左右,森林虽然覆盖率不高,但分布很广。林火和草原火的监测一直是国家野外防火工作的重点。1987年大兴安岭森林火灾,气象卫星在灭火工作中发挥了关键作用。人们开始认识到利用气象卫星观测频次高的特点,可以有效监测各种火灾。普朗克公式表明,高温火点在中红外谱段的辐射远大于常温地物目标,因此,当火点出现时,中红外波段计数值会出现急剧的变化,造成与周围像元的明显反差。这便是气象卫星火灾监测的基本原理。实际业务中可利用中红外、近红外、可见光通道组成的多光谱彩色合成图,突出火点。理论和实验都表明,只要像

元有万分之一的面积燃烧,卫星就可以识别出火来<sup>[16]</sup>。图9a-b是风云三号B星2017年2月7日火情监测图。

### 4.2 卫星蓝藻监测

由于工业废水和有机污染物质的大量排放,使得内陆湖的水体富营养化问题严重,蓝藻水华现象时有发生。蓝藻水华是蓝藻大量繁殖后,聚集上浮到水面形成的绿色油漆样漂浮物,呈片状或带状分布。蓝藻水华过程具有暴发面积大、时空变化剧烈的特点,传统的逐点监测方式在时效性与空间覆盖度方面都存在缺陷,需要利用卫星手段予以解决。蓝藻暴发时会引起水体温度、色度和透明度等一系列物理性质发生变化,进而导致水体反射波谱特性的改变。根据水华光谱曲线可知,对于不同蓝藻密度的蓝藻水华在近红外波段都有很强的反射,其反

射率明显高于水体,而在可见光红光波段有较强的吸收,其反射率甚至低于水体。利用近红外波段和红光波段的比值可以突出蓝藻水华的信息。另外,基于海水和海洋藻类、赤潮在光谱特征差异,利用气象卫星也可以对海洋中的大面积的浒苔、赤潮等进行监测,为海洋生态环境治理提供信息<sup>[17]</sup>。图



10 就是气象卫星蓝藻监测结果。

利用气象卫星 2016 年 12 月 4 日 14:45(北京时间)资料制作的太湖蓝藻水华监测图像(图 10a-b)显示:太湖部分水域有蓝藻水华,蓝藻水华强度等级以轻度为主。经估算,蓝藻水华影响范围总计约 420 km<sup>2</sup>。



图 9 2017 年 2 月 7 日云南省火情气象卫星监测多通道合成图(a)和专题图(b)

Fig. 9 Fire monitoring multi-channel synthesis (a) and thematic (b) maps in Yunnan province based on Fengyun Meteorological Satellite on 7 Feb. 2017

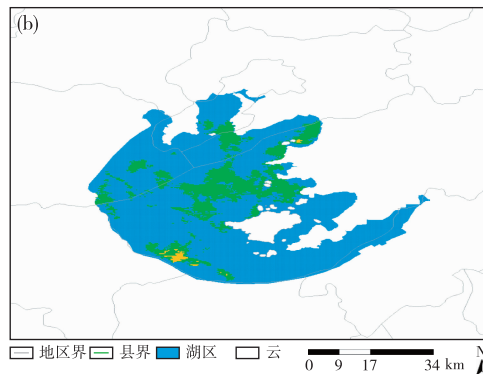
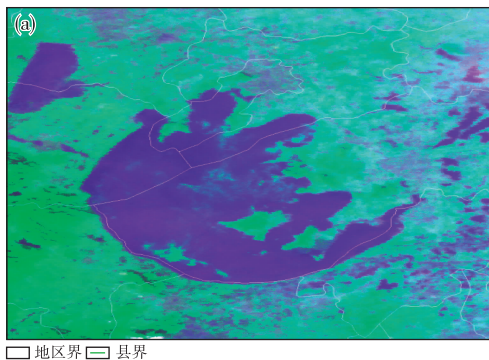


图 10 2016 年 12 月 4 日太湖蓝藻水华气象卫星监测图(a)和强度示意图(b)

Fig. 10 Blue alga monitoring map (a) and intensity diagram (b) in Taihu lake based on Fengyun Meteorological Satellite on 4 Dec. 2016

### 4.3 卫星霾监测

霾属于吸收性气溶胶,由于具有较大的复折射指数虚部,它的消光系数表现出特有的随波长变化的光谱特征,这一特征在紫外波段尤为突出<sup>[18]</sup>。因此,可以通过通道组合将其区分出来。尽管厚云层的遮挡以及颗粒的吸湿作用会影响到霾识别的准确性,但气象卫星丰富的光谱通道仍然使其成为监测大范围霾的有效手段。图 11a-b 是 2015 年 12 月 20 日红色预警期间的霾监测图像。由图可见,华北、黄淮和陕西关中地区出现了重度霾天气,在图中表现为灰黄色。在霾影响区域,吸收性气溶胶指数(AAI)超过了 3.5,说明这次污染过程受吸收性气溶胶影响十分明显。

## 5 气候变化研究

### 5.1 卫星臭氧监测

平流层臭氧吸收了太阳紫外线,是地球生命的保护伞。而对流层臭氧是光化学烟雾的组成部分,危害着人体健康。气象卫星主要利用紫外仪器实现大气臭氧总量的探测,其原理是太阳发出的紫外线穿过大气到达地面后再反射回太空后被卫星探测器接收,在这个过程中紫外线因大气中臭氧的吸收而减弱,紫外线的波长越短,臭氧的吸收作用越强,因此,两个波长上观测结果的差异与臭氧总量存在对应关系<sup>[19]</sup>。图 12a 是利用中国的风云三号气象卫星得到的全球臭氧总量<sup>[20]</sup>。图中可见南极



地区的臭氧总量在 200 DU 以下,臭氧洞已经形成。

图 12b 为风云三号气象卫星探测的南极臭氧洞。

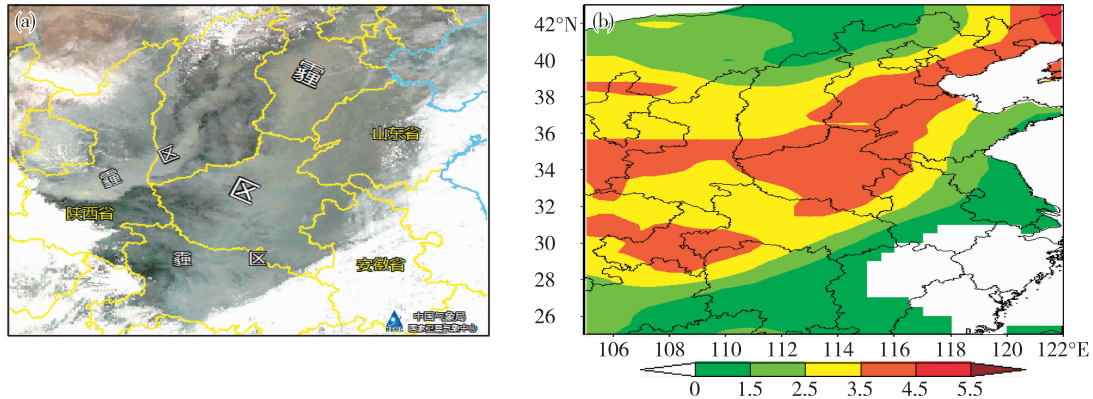


图 11 2015 年 12 月 20 日 14:00(北京时)风云 FY-3B 卫星监测图像(a)和吸收性气溶胶指数(AAI)分布(b)  
Fig. 11 The image of FY-3B (a) and the absorbing aerosol index (b) at 14:00 BST 20 December 2015

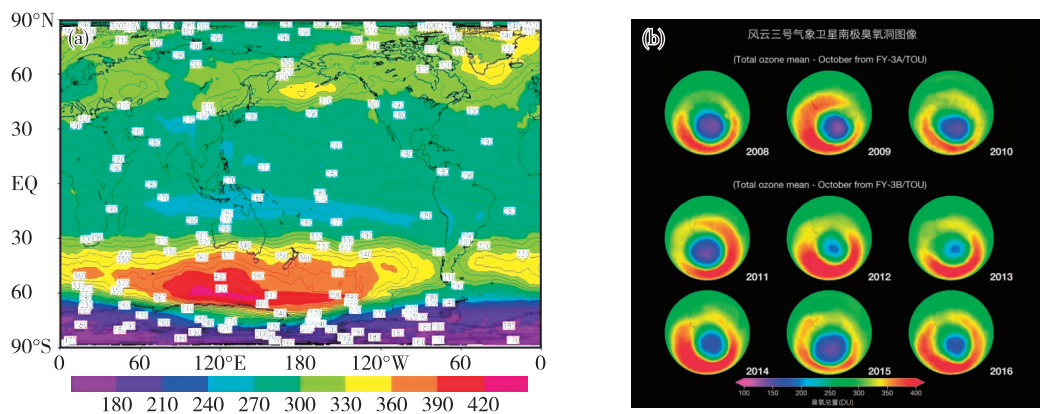


图 12 FY-3B 2016 年 9 月全球臭氧总量分布(a,单位:DU)和 FY-3 2008—2016 年南极臭氧洞图(b)  
Fig. 12 The global total column ozone in September 2016 from FY-3B (a, unit: DU) and the Antarctic ozone hole during 2008—2016 from FY-3 (b)

## 5.2 卫星极冰监测

气象卫星具有冰覆盖的监测能力,这种能力对于监测人迹罕至的极区冰雪覆盖具有特别的意义。当有可见光图像时,良好的照射条件使我们可以较好地利用滑动处理等方法监测极区冰雪的存在,但在极夜条件下,受光照因素和云层作用的共同影响,需要借助被动微波遥感数据完成冰雪监测。被动微波遥感进行极区冰雪观测的主要原理是:海水与冰雪的极化发射率存在明显的区别,通过阈值、迭代计算、滑动处理等方法,结合大气影响订正计算,就可获得每一个被动微波遥感像元内的冰雪覆盖比例<sup>[21]</sup>。利用极轨卫星搭载的光学和微波传感器,每天都能够获取极区冰雪覆盖产品(图 13a-b)。

## 5.3 卫星湖泊面积变化监测

水体判识是湖泊面积变化监测的基础。水体在近红外通道有很强的吸收,反射率极低,在可见

光通道的反射率较近红外通道的反射率高。植被在可见光通道的反射率较近红外通道的反射率低。在近红外通道波长范围内,植被的反射率明显高于水体的反射率,而在可见光通道波长范围内,水体的反射率高于植被的反射率。裸土的反射率在可见光通道波长范围高于植被和水体,在近红外通道高于水体,低于植被。利用这一特点可以从可见光和近红外通道数据中提取地表水体信息。在晴空条件下,利用风云三号卫星 MERSI 通道 4 或 VIRR 通道 2 等近红外通道,通过建立不同区域、不同季节水体判识阈值可以准确提取水体信息。当水体被薄云覆盖时,地表反射有一部分可透过云层,在可见光和近红外通道图像上有可能看到云层下显现的水体,该点的反射率值往往高于薄云附近晴空陆地的反射率。若仍仅用近红外通道资料取门槛值判识水体,将会把薄云附近的陆地作为水体误判。

可通过对可见光和近红外通道反射率的比值计算,滤掉薄云信息的影响,提取水体信息<sup>[22]</sup>。图 14 是利用气象卫星对鄱阳湖水体进行监测,2016 年最大

水体面积较 2015 年最大水体面积增大约 17%,水体范围主要增大在鄱阳湖北部和中南部。

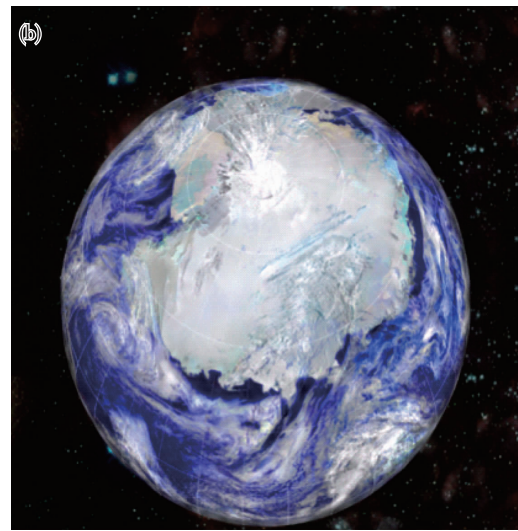
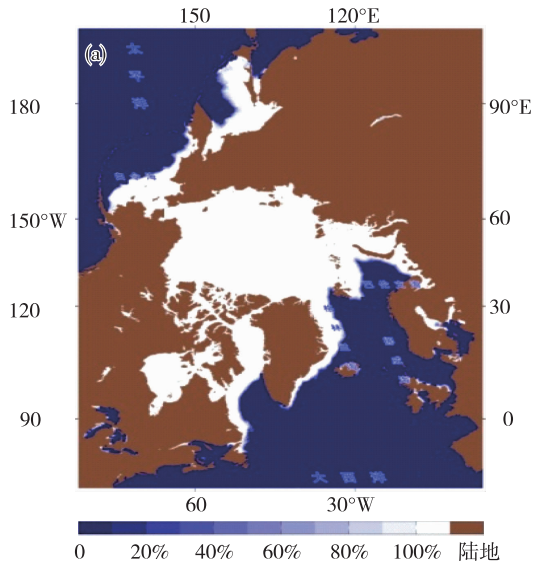


图 13 北极(a)和南极(b)海冰覆盖监测图

Fig. 13 Arctic sea ice cover (a) and Antarctic snow/ice cover (b)

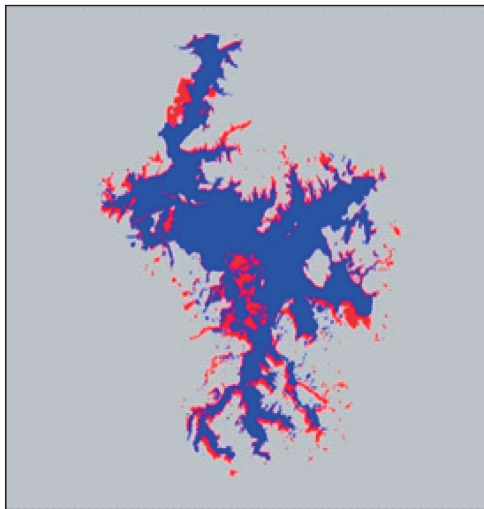


图 14 气象卫星监测鄱阳湖 2016 年与 2015 年最大水体对比

Fig. 14 Comparison of the maximum water body area between 2016 and 2015

## 6 结论与展望

随着空间遥感技术的进步,气象卫星遥感应用不断深入。时至今日,气象卫星遥感图像已经成为气象台站常规天气会商不可或缺的重要信息。不仅如此,气象卫星遥感图像及其产品还在各种自然

灾害监测、生态与环境遥感以及气候变化研究方面发挥着极其重要的作用。展望未来,随着卫星遥感技术的进步,气象卫星遥感资料将具有更高空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率以及更高辐射测量精度。主动探测手段的出现,还将使我们能够得到各种天气系统三维垂直结构信息。这些新型卫星遥感资料的获取,会对气象卫星资料应用产生革命性影响,使卫星应用水平再上新台阶。

### 参考文献:

- [1] 卢乃锰,谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报,2016,20(5):832-841.
- [2] 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.
- [3] 邱红,方翔,谷松岩,等. 利用 AMSU 分析热带气旋结构特征[J]. 应用气象学报,2007,18(6):810-820.
- [4] 王新,方翔,刘年庆. 热带气旋垂直倾斜度估算及在强度分析中的应用[J]. 应用气象学报,2013,24(6):714-722.
- [5] 游然,卢乃锰,邱红,等. 用 PR 资料分析热带气旋卡特里娜降水特征[J]. 应用气象学报,2011,22(2):203-213.
- [6] 窦芳丽,卢乃锰,谷松岩. 星载双频风场雷达热带气旋降雨区测风模拟[J]. 应用气象学报,2012,23(4):467-477.

- [7] 蒋建莹,王瑾,刘年庆,等. QX/T 177-2012,中尺度对流系统卫星遥感监测技术导则[S]. 北京:气象出版社,2012.
- [8] 方宗义,朱福康,江吉喜,等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京:气象出版社,1997.
- [9] 卢乃锰,魏景云. 巧借慧眼识黄沙—气象卫星怎样识别沙尘暴[J]. 科技文萃,2001,1(7):154-155.
- [10] 胡秀清,卢乃锰,张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴[J]. 应用气象学报,2007,18(3):266-275.
- [11] Zhang P, Lu N, Hu X, et al. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels[J]. Global and Planetary Change, 2006, 52: 197-206.
- [12] 吴晓京,陈云浩,李三妹. 应用MODIS数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演[J]. 遥感学报, 2005,9(6):688-696.
- [13] 吴晓京,张苏平. 大雾消散卫星遥感临近预报及消散型分类—我国中东部案例研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6):134-138.
- [14] Allen R C, Durkee P A, Wash C H. Snow/cloud discrimination with multi-spectral satellitemeasurements[J]. J Appl Meteorol, 1990, 29(10):994-1004.
- [15] Frei A, Tedesco M, Lee S, et al. A review of global satellite-derived snow products[J]. Adv Space Res, 2012, 50(8):1007-1029.
- [16] 郑伟,邵佳丽,王萌,等. 多源卫星遥感草原火灾动态监测分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3):54-61.
- [17] 韩秀珍,郑伟,刘诚. 卫星遥感太湖蓝藻水华监测评估及系统建设[M]. 北京:气象出版社, 2011.
- [18] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation; Theoretical basis[J]. J Geophys Res, 1998, 103(D14):17099-17110.
- [19] Dave J V, Mateer C L. A preliminary study on the possibility of estimating total atmospheric ozone from satellite measurements[J]. J Atmos Sci, 1967, 24(4):414-427.
- [20] 张艳,王维和,张兴赢. 卫星遥感监测大气臭氧总量分布和变化[J]. 科技导报, 2015, 33(17):23-29.
- [21] Markus T, Cavalieri D J. An enhancement of the NASA team sea ice algorithm[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2000, 38(3):1387-1398.
- [22] 邵佳丽,郑伟,刘诚. 卫星遥感洞庭湖主汛期水体时空变化特征及影响因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 8(8):1315-1321.