

文章编号:1006-1630(2017)04-0008-12

FY-4 卫星应用和发展

张志清¹, 陆 风¹, 方 翔¹, 唐世浩¹, 张晓虎¹, 许映龙², 韩 威², 聂肃平³, 申彦波⁴, 周毓荃⁵

(1. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局 国家气象中心, 北京 100081; 3. 中国气象局 国家气候中心, 北京 100081; 4. 中国气象局 公共气象服务中心, 北京 100081; 5. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要:介绍了我国新一代静止气象卫星风云四号(FY-4)卫星应用及其发展。给出了FY-4卫星装载的先进静止轨道辐射成像仪、静止轨道干涉式红外探测仪、闪电成像仪和空间环境监测仪4种主要观测仪器,以及卫星的观测能力和提供的量化产品,并与我国现有的业务卫星风云二号(FY-2)卫星和国际同期在轨静止气象卫星性能进行了比较。FY-4光学卫星系列与美国GOES-R、日本Himawari-8/9卫星和欧洲MTG卫星性能相似,属于与国际同期发展的先进静止气象卫星。给出了FY-4A星获得的图像和数据。列出了FY-4A星的基本定量产品,给出了使用的仪器、数据特性、物理意义,以及应用领域、方法和范例。描述FY-4卫星提供的量化产品及其在数值天气预报、气候、生态环境、专业气象服务、人工影响天气、空间天气监测预警等领域的应用,并介绍了FY-4A星在轨测试期间的部分应用。对FY-4后续业务卫星发展进行了展望。

关键词:FY-4卫星; 先进静止轨道辐射成像仪; 静止轨道干涉式红外探测仪; 闪电成像仪; 空间环境监测仪; 数值天气预报; 气候; 生态环境; 专业气象服务; 人工影响天气; 空间天气监测预警

中图分类号:P13 文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.002

Application and Development of FY-4 Meteorological Satellite

ZHANG Zhi-qing¹, LU Feng¹, FANG Xiang¹, TANG Shi-hao¹, ZHANG Xiao-hu¹,
XU Ying-long², HAN Wei², NIE Su-ping³, SHEN Yan-bo⁴, ZHOU Yu-quan⁵(1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. National Satellite Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
4. Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
5. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract:The application and its development of FY-4 meteorological satellite was introduced in this paper, which was the new generation geostationary meteorological satellite in China. The four main instruments were presented, which were Advanced Geosynchronous Radiation Imager (AGRI), Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder (GIIRS), Geostationary Lightning Mapping (GLM) and Space Environment Monitor. And so were the satellite's observation and quantified products. The performances of FY-4 satellite were compared with Chinese FY-2 meteorological satellite and other geostationary meteorological satellites on orbit in the world. FY-4 optical satellite series are similar to GOES-16 of the United States, Himawari-8/9 of Japan and MTG of European Meteorological Satellite Organization, which belong to the same period advanced meteorological satellite. The images and data obtained by FY-4A satellite were given. The basic quantified products of FY-4A satellite were listed. The using instrument, data characteristic, physical meaning, and application field, method and samples were also presented. The quantified products applications based on FY-4 satellite in numerical weather prediction, climate, eco-environment, specialized meteorological service, weather modification, space weather monitoring and

收稿日期:2017-06-13;修回日期:2017-08-08

基金项目:国家高技术研究发展计划资助(2009AA12Z50);国家自然科学基金资助(41575048,61527805,41175023)

作者简介:张志清(1964—),男,二级研究员,风云二号和风云四号气象卫星地面应用系统总设计师,主要研究方向为气象卫星遥感。

warning were given. Some applications of FY-4A satellite during the test were given. The development of follow-up FY-4 satellite series were prospected at last.

Keywords: FY-4 meteorological satellite; Advanced Geosynchronous Radiation Imager (AGRI); Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder (GIIRS); Geostationary Lightning Mapping (GLM); Space Environment Monitor; numerical weather prediction; climate; eco-environment; professional meteorological service; weather modification; space weather monitoring and warning

0 引言

中国是世界上遭受自然灾害最严重的国家之一。联合国公布的全球因自然灾害造成人员死亡,其中60%以上是由气象灾害造成的,而造成的经济损失所占比例则更高。作为中国新一代静止轨道气象卫星,FY-4卫星承担地球区域大气和地表的高频次观测,主要应用目标是为提高天气预报准确率提供监测数据和产品。在现代气象业务发展中,天气预报技术和观测技术既是依赖的关系,又是越来越相互促进的关系。观测的要素增加、精度提高、更高空间分辨率、更高时间分辨率等,已成为促进和提高中小尺度模式的天气预报水平的发展动力与支撑条件;数值天气预报模式的发展和精细化的天气预报更是对观测提出了更高的要求。无论是天气服务、减灾防灾,还是应对气候变化,生态文明建设,高精度、高频次量化监测和预报准确率是核心与关键。

FY-4卫星是中国继FY-2卫星之后,发展的新一代静止气象卫星^[1]。按发展规划分为光学星和微波星两个系列。2016年12月11日成功发射的是光学卫星系列的科研试验卫星(FY-4A星)。该卫星采用三轴稳定姿态控制方式的大型遥感平台携带多种观测仪器,包括先进静止轨道辐射成像仪、静止轨道干涉式红外探测仪、静止轨道闪电成像仪和空间环境监测仪器等^[2]。2016年12月17日,定点于东经99.5°;2016年12月26日,启动在轨测试,有效载荷开机工作;2017年1月19日,先进静止轨道辐射成像仪红外通道加电工作,获取全部14个通道的原始图像;2017年2月9日,干涉式大气垂直探测仪红外探测通道加电工作,获取原始干涉数据;2017年2月27日,FY-4光学星系列的科研试验卫星第一套图像和数据发布;2017年5月18日至25日,卫星从东经99.5°漂移并定点于东经104.5°,继续在轨测试。卫星发射和在轨测试情况表明:卫星平台和观测仪器工作正常,性能稳定,星地接口匹配,已建立了高时效的星地作业流程,图像定位与配准精度、辐射定标精度均达到设计指标,实现了全部

定量化产品的实时处理和生成。

与国际同期先进的静止气象卫星相比,FY-4A星的技术独特性是:成功解决了多台带有光学运动部件的观测仪器在同一平台上工作而不产生相互间电磁和动力学干扰的工程技术难题(欧洲采用两台主要仪器分置于两颗卫星上的方案),对单颗卫星来说,是静止气象卫星中装载仪器数量和种类最多的,提高了卫星的观测能力和效率;在国际上首次实现了静止轨道的红外高光谱大气探测;掌握了有自主知识产权的多台载荷同步工作的高精度图像导航和配准技术,在工程中成功实现并为后续发展奠定了坚实的基础。

FY-4光学系列卫星的主要任务是:获取地球表面和云的多光谱、高精度定量观测数据和图像,特别是高频次的区域图像,全面提高对地球表面和大气物理参数的多光谱、高频次、定量探测能力;实现大气三维结构探测,获得垂直分辨率和精度更高的温度与湿度参数;实现闪电成像观测,获取观测覆盖区范围内的闪电分布图;利用星载转发器进行卫星图像和产品的广播分发及自然灾害警报信息发布;利用数据收集系统自动收集多种地球环境参数资料;监测太阳活动和空间环境,为空间天气预报业务和研究提供观测数据^[3]。

本文介绍了FY-4卫星的应用及发展。

1 FY-4A星观测能力和提供的定量化产品

1.1 观测能力

发展新一代静止气象卫星,其主要需求包括以下。

a) 提高天气预报预测准确率的需求。提升天气预报预测准确率的核心是提高数值预报准确率。随着数值预报模式的不断完善,对地球大气系统的初值和边值的种类、精度和时、空分辨率等提出了更高的要求。

b) 应对气候变化的需求。气候变化开始显露出

对人类生存条件的威胁,全球气候变化的影响因素是复杂而多样的,许多气候变化的因子有机地结合在一起,并构成一个因子系统,共同影响气候变化,需要对这些气候变化的因子进行连续、准确的观测。

c) 防灾减灾的需求。我国地处亚洲季风活跃地区,幅员广阔,丰富的气候资源和复杂多变的地质地貌,使台风、暴雨、强对流天气和洪涝、旱灾、沙尘暴、泥石流等多种主要重大自然灾害在我国频繁发生。气象灾害往往起源于常规观测稀少的海洋、山区和高原,静止气象卫星是重要监测手段。

d) 生态与环境监测的需求。生态文明建设是未来一个时期的重要任务,生态和环境相互依存,密不可分,静止气象卫星可对洪涝、干旱、积雪、森林与草原火灾等生态环境进行连续监测和提供服务。

f) 空间天气监测预警的需求。静止气象卫星不仅是地球大气的重要监测平台,而且是空间天气监测的理想平台。

在国际上,我国静止气象卫星已被纳入地球观测组织的发展规划,作为静止气象卫星星座的主要成员,要求其仪器配置和性能与国际兼容,便于数据的全球交换、共享和应用。

静止气象卫星的对地观测能力,是卫星的综合性能指标^[4]。卫星的观测能力首先受制于平台的性能、姿态控制方式和性能、能提供的能源、承载能力、数据传输容量、提供仪器工作的热环境,以及工作寿命等,这些本应为观测仪器服务的要素,直接决定观测仪器工作的边界条件。在卫星平台具备条件后,仪器的性能则显得更重要,直接决定观测数据的质量。尤其是在地球同步轨道上,卫星离地球约 35 800 km,所要观测的目标距离远(是低轨道卫星

仪器观测与地球目标距离的 40 倍),这就导致仪器获取的目标能量微弱。为获得满足定量产品的反演精度的观测信息,设计的仪器光学结构、扫描机构、制冷装置等庞大而复杂,相应的仪器和卫星重量也成倍增加,使静止卫星的技术难度明显增大。

FY-2 卫星采用自旋稳定姿态工作体制,相当于陀螺能提供较高的姿态稳定度,为成像和图像的定位提供了有利条件^[5]。它通过自旋扫描地球,在静止轨道上观测,地球视场张角约 18°,即卫星在自旋 1 周的 360°中只有 18°为有效观测,其余部分是在扫描太空,观测效率不足 5%。因此,自旋稳定姿态工作体制的卫星无法开展高光谱大气垂直探测、闪电观测和对太阳及空间环境的定向观测。

FY-4A 星采用了当今多项先进技术,利用新研发的三轴稳定姿态控制的大型遥感平台,避免了自旋稳定姿态工作平台的局限性,卫星装载多种观测仪器^[6]。

FY-4A 星性能与 FY-2 卫星比较见表 1。由表 1 可知:除新增大气垂直探测和闪电观测功能外,FY-4A 星装载的先进静止轨道辐射成像仪和空间天气仪器显著提升了性能。先进静止轨道辐射成像仪的成像观测通道从 FY-2 卫星的 5 个扩展到 14 个,全圆盘图像观测时间从 0.5 h 缩短到 15 min,最高空间分辨率从 1.25 km 提高到 0.5 km。

FY-4A 星性能与国际同类卫星比较见表 2。由表 2 可知:FY-4A 星的先进静止轨道辐射成像仪,其 14 个成像通道与国际水平相当;静止轨道干涉式红外探测仪在世界上首次实现了静止轨道红外高光谱探测,可获取大气温湿度三维结构,处于国际领先水平;静止轨道闪电成像仪首次实现了对亚洲大洋洲区域的静止轨道闪电持续观测。国外仅美国新一

表 1 FY-4A 星性能与我国现有业务卫星对比

Tab. 1 Performance comparison of FY-4A satellite and FY-2 satellites

卫星	FY-4A	FY-2
姿态稳定方式	三轴	自旋
设计寿命	7 年	4 年
观测效率	85%	5%
观测模式	成像+探测+闪电成像	成像
主要仪器	先进静止轨道辐射成像仪:通道 14 个,分辨率 0.5~4 km,全圆盘成像时间 15 min	可见近红外自旋扫描辐射计:通道 5 个,分辨率 1.25~5 km,全圆盘成像时间 30 min
	静止轨道干涉式红外探测仪:通道约 1 600 个,星下点分辨率 16 km,光谱分辨率 0.8,1.6 cm ⁻¹	无
	静止轨道闪电成像仪:星下点分辨率 7.8 km	无
	空间环境监测仪器、高能粒子、电磁场	空间环境监测仪、高能粒子

代静止轨道气象卫星 GOES-R 搭载了静止轨道闪电成像仪对西半球美洲区域进行观测^[7]。

1.2 定量化产品

FY-4A 星定点后的在轨测试,建立了利于成像的卫星工作坐标系、星地业务测控流程、数据传输及处理流程,以及星地图像导航与配准流程,携带的全

部仪器按设计要求进入了工作状态,连续获取了图像和数据。其中:先进静止轨道辐射成像仪获取并处理生成的彩色合成图和 14 个单通道图像如图 1 所示;静止轨道干涉式红外探测仪在国际上首次在静止轨道上获取的红外高光谱大气垂直结构的光谱图如图 2 所示;闪电分布图如图 3 所示;空间环境监测数据如图 4、5 所示。

表 2 FY-4A 星性能与国际同期在轨静止气象卫星对比

Tab. 2 Performance comparison of FY-4A and abroad GEO meteorological satellites

国别		美国	日本	欧洲	中国	
卫星(发射时间)		GOES-16(2016 年)	Himawari-8(2015 年)	MTG-I/S(2017/19 年)	FY-4A(2016 年)	
设计寿命/年		10	10	7.75~8.25	7	
姿态稳定方式		三轴稳定	三轴稳定	三轴稳定	三轴稳定	
成像辐射计	空间分辨率/	0.5(最高)	0.5(最高)	0.5(最高)	0.5(最高)	
	可见					
	km	红外	2	2	2	2~4
	通道/个	16	16	16	14	
时间分辨率/min		10	10	10	15	
大气垂直探测仪	分光方式	无	无	干涉式分光	干涉式分光	
	通道/个			1 736	1 600	
	空间分辨率/km			4	16	
	成像时间/min			全圆盘 60	区域 60	
闪电成像仪	中心波长/nm	777.4	无	777.4	777.4	
	空间分辨率/km	8		8	7.8	

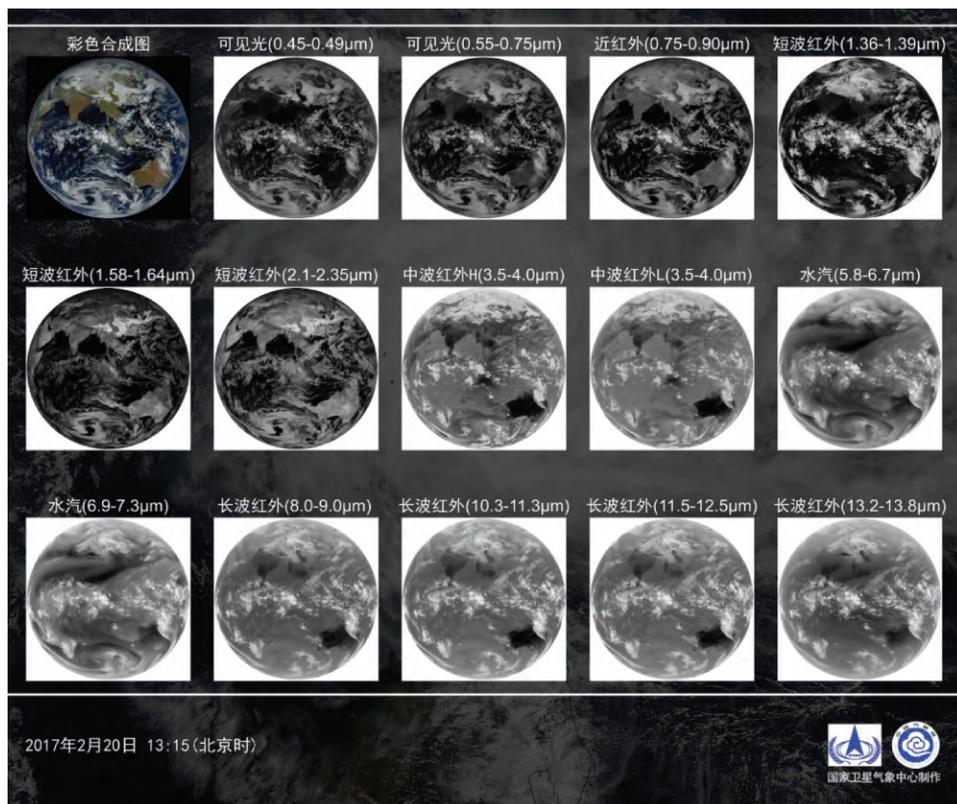


图 1 FY-4A 星 AGRI 第一套图像

Fig. 1 The first set of images of FY-4A AGRI

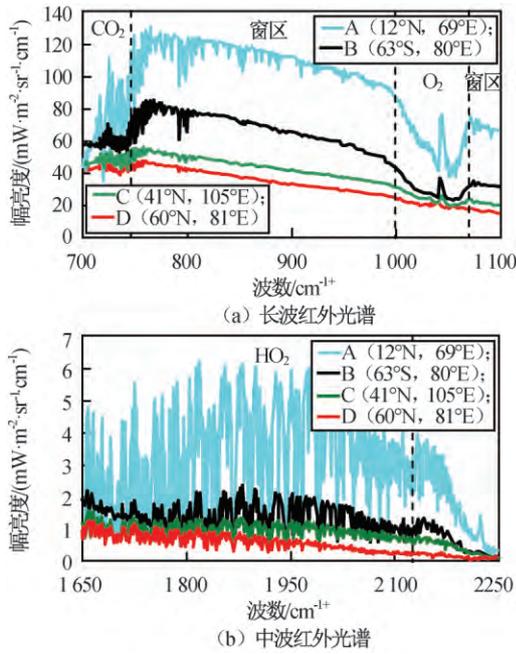


图2 FY-4A星GIIRS获取的4个不同地区的大气光谱图
Fig. 2 Atmospheric spectrums of 4 different area by FY-4A GIIRS

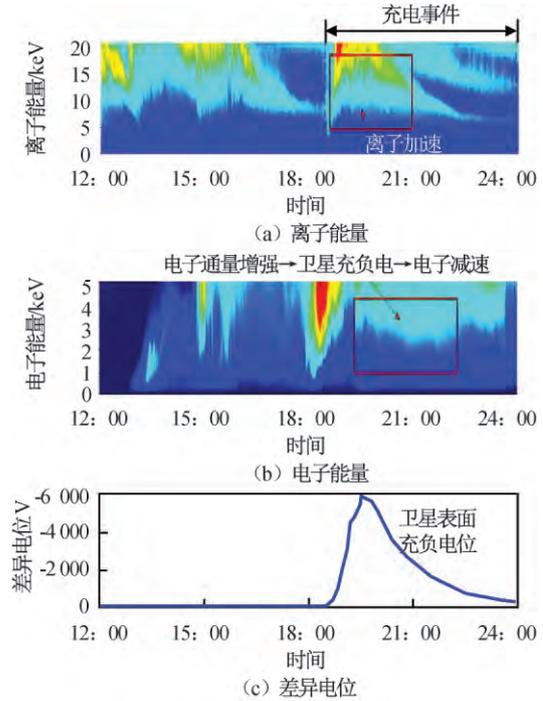


图4 FY-4A星监测到的一次表面充电过程
Fig. 4 First surface charging monitored by FY-4A satellite

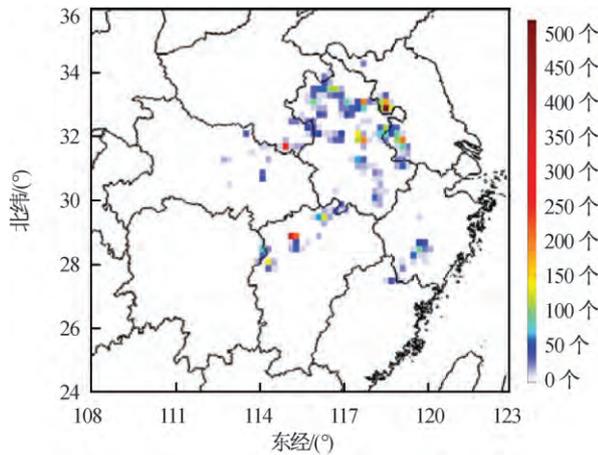


图3 2017年4月8日FY-4A星静止轨道闪电成像仪获取的我国中东部一次强雷暴过程
Fig. 3 A strong rainstorm process in middle and east of China by FY-4A GLM on April 8, 2017

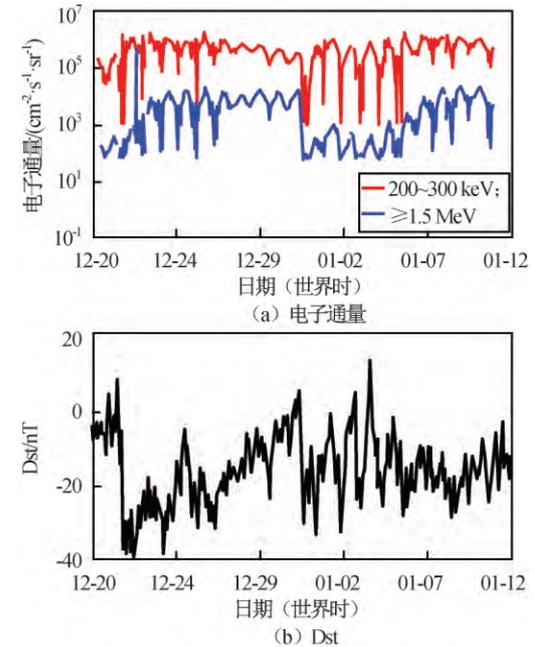


图5 FY-4A星监测到的高能电子通量变化
Fig. 5 High energy electron flux change monitored by FY-4A satellite

FY-4A星的原始观测数据是目前运行的FY-2卫星的80倍,处理生成的产品数据则是其160倍,可反演生成大气、辐射、云、地表、降水等多种具有大气物理意义的定量产品。这些遥感产品,可用于天气分析、数值预报、气候、生态环境、专业气象服务、人工影响天气,以及空间天气预报预警服务,也可用于二次开发应用。FY-4A星基本定量产品见表3。

这些产品在卫星发射前已完成了算法研制和测试,在轨测试根据仪器性能进行调试后即可投入应用。与上一代业务卫星FY-2卫星相比,FY-4卫星能提

表 3 FY-4A 星基本定量产品
Fig. 3 Basic quantified products of FY-4A satellite

FY-2 卫星		FY-4A 星		
产品	仪器	产品	仪器	
云检测	可见 近红外 自旋 扫描 辐射计	云检测	AGRI	
云分类		云分类		
云总量		云总量		
降水估计		降水率/降水估计		
大气运动矢量		大气运动矢量		
射出长波辐射		射出长波辐射		
相当黑体亮度温度		相当黑体亮度温度		
地表入射太阳辐射		地表入射太阳辐射		
云分析出的湿度廓线		大气湿度廓线		GIIRS
晴空大气可降水		水汽总量与分层水汽产品		
对流层上部相对湿度		分层水汽	AGRI	
沙尘检测		气溶胶检测(包含沙尘检测)		
海表温度		海表温度		
积雪覆盖		积雪覆盖		
地表温度		地表温度		
		云顶温度		
		云顶高度		
		云顶气压		
		云光学厚度		
		云液态水含量		
		云粒子半径		
		云相态		
		地表下行长波辐射		
		地表上行长波辐射		
		反射短波辐射		
		气溶胶光学厚度		
		对流初生		
		火点/热源点检测		
		雾检测		
		地表比辐射率		
		地表反照率		
		对流层顶折叠检测		
	大气温度廓线	GIIRS		
	大气臭氧廓线/臭氧总量			
	大气稳定度指数	GLM		
	闪电探测			

供的产品种类和覆盖的应用领域显著提升。

FY-4A 星不同产品的使用仪器、数据特性、物理意义,以及应用领域、方法和应用范例如下。

云检测 用先进静止轨道辐射成像仪的可见光、近红外和红外波段的高时间、空间分辨率数据自动生成每个像素的云检测信息,云检测信息分为云、可能是云、晴空、可能是晴空四种。云检测信息将广泛用于需要每个像素云检测信息的下游 L2 产品。如地表温度和海面温度产品只对晴空区域的像素进行计算。在数值预报同化中,可用云检测产品确定可同化进入数值预报的成像仪像素信息。

云分类 用先进静止轨道辐射成像仪的多个红外通道数据经一系列光谱和空间测试获取 6 种不同的云类型:水、过冷水、混合(水和冰)、厚冰、薄冰和多层冰。云分类产品包含的多层云和卷云的信息是后续产品(如云顶高度产品)的重要输入信息。另外,云类型产品也是下游 L2 云相关的产品(包括云光学特性和雾检测等)的输入数据。

降水估计 用先进静止轨道辐射成像仪红外通道亮温数据反演生成每个红外像元的降水率。通过降水估计产品,可了解 1/6/24 h 内的降水情况,监测降水的强度、范围、面积、趋势走向等;降水估计产品可为天气分析和预报、洪涝监测预报服务;结合其他信息,可为模式模拟、同化提供重要的初始场数据。

大气运动矢量 用一系列先进静止轨道辐射成像仪红外通道数据跟踪云或水汽的运动,并估计云或水汽的高度。产品在地球广阔地区提供了重要的对流层风信息,包括缺乏探空观测的海洋和南半球陆地。该产品为数值预报数据同化系统提供关键的风的观测信息,其使用已被证明可改善包括热带气旋在内的数值预报。此外,该产品可为天气预报员改进预报提供指导。

射出长波辐射 是大气顶部向上的总出射长波辐射的度量,提供了关于地球排放能源和大气顶部总体能源的重要信息。它是确定大气顶部的地球辐射收支的三个辐射预算参数之一,另两个参数是入射的太阳辐射和反射的太阳辐射。射出长波辐射产品直接由多个成像仪通道每个像素的数据计算获得。该产品连同入射太阳总辐射和反射太阳辐射共同定义了大气顶部的地球辐射收支,了解地球的辐射收支对气候监测至关重要。

相当黑体亮度温度 是指由气象卫星红外窗区通道测得的辐射值,通过应用普朗克函数处理转换成辐射亮度温度形成的信息产品。

到达地表的下行短波辐射 又常被称为地表入射太阳辐射,是指地球表面接收到的总太阳辐射能,它位于电磁光谱的短波部分,波长范围约在 0.2~4.0 nm 间,包括到达地表的直接太阳辐射、大气散射太阳辐射,以及经大气和地表间多次散射后最终到达地表的散射太阳辐射。作为地球表面获得能量的首要来源,地表收入的太阳辐射控制了大气与陆表、海面间的能量交换,因此对各种天气、气候的形成都有决定性的意义,在天气预报、气候研究等

科研领域有直接的应用。同时,到达地表的太阳辐射能也是驱动蒸散、植物生长、水分循环、材料老化等相关生物、物理过程的主导因子,这使地表入射太阳辐射信息对生态环境监测研究、水文监测、作物生长模型研究、森林草场火险监测预警,以及建筑和国防科技等的发展来说非常关键。此外,在当今全球能源短缺的背景下,太阳辐射能作为最重要的一种绿色可再生能源为各国所重视。开发太阳能资源和发展太阳能工业的一个基本前提,就是要对地表入射太阳辐射进行实时估计和短期预测研究,在此基础上建立和优化太阳能的利用模型,对有效利用太阳能资源有至关重要的作用。在上述应用领域中,需要精确知道到达地表的入射太阳辐射的数值及其在时间、空间上的分布和变化情况。

大气温度廓线 是用干涉式大气垂直探测仪高光谱数据反演获得对流层温度垂直分布信息的产品。该产品提供的大气垂直温度结构信息可被天气预报员和数值预报模式使用;使用该产品可计算一些表征大气稳定度的指数产品,为天气预报员提供有关大气稳定性的指导,对恶劣天气预报非常重要。

大气湿度廓线 是用干涉式大气垂直探测仪高光谱数据反演获得对流层湿度垂直分布信息的产品。该产品提供的大气水分垂直分布信息对预测恶劣天气至关重要。这种垂直湿度信息还用于初始化区域和中尺度数值预报模式中的湿度场。

大气稳定度指数 是指由大气温湿度廓线产品衍生出的表征大气稳定性指标的产品,包括有效位能(CAPE),抬升指数(LI),沙氏指数(SI)和K指数(KI)产品。这些指数产品将有助于天气预报员预测极端天气,天气预报员通过使用这些信息监测不同地理位置随时间的大气稳定性的快速变化,从而提高极端天气的监测/预警能力。

大气臭氧廓线 是用干涉式大气垂直探测仪高光谱数据反演获得对流层臭氧垂直分布信息的产品;臭氧总量产品反映了从地球表面到大气层顶的臭氧总含量。总臭氧产品可向天气预报员提供信息,有助于预测大气紊流区域,并提供更好的空气质量预测。

大气分层水汽 是用先进静止轨道辐射成像仪多个红外通道数据反演获得对流层湿度垂直分布信息的产品。该产品提供的大气水分垂直分布信息对预测恶劣天气至关重要,这种垂直湿度信息还用于初始化区域和中尺度数值预报模式中的湿度场。

大气总可降水 从大气分层水汽产品衍生得到,代表大气层中从地球表面到大气顶部的总水汽含量。该产品将为天气预报员和水文学家提供有用的信息,以便在需要预测事件的情况下改善其趋势预测,如暴雨、山洪和季风等的预测。产品还用于初始化数值天气预报中的湿度场。

气溶胶检测(包含沙尘检测) 用先进静止轨道辐射成像仪提供的通道数据,利用不同气溶胶的已知光谱吸收和散射特性检测其在大气中的存在。该产品将使天气预报员能更好地监测烟尘的区域,这可能是可见度和空气质量预测的关键因素。除短期预测外,该产品还能更好地监测气溶胶量和分布在整个大气层的长期趋势。

海表温度 提供先进静止轨道辐射成像仪海洋区域每个晴空像素的海表温度信息。产品有助于大量的业务应用,包括气候监测/预测、季节预报、天气预报和海洋预报业务、军事和国防作战、海洋和大气模式,以及旅游和商业渔业管理等。

积雪覆盖 用先进静止轨道辐射成像仪可见光和近可见光数据反演生成积雪覆盖信息产品。产品将支持大量业务应用,包括数值预报同化、水文预报/预警(包括河流和洪水预报、水资源管理、积雪检测和分析,以及气候研究等)。

地表温度 用先进静止轨道辐射成像仪长波红外通道数据反演生成陆地表面的温度信息产品。产品可用于水文、气象和气候领域的多种业务应用。气象预报员可用该产品预测雾和霜的发生;对地表净辐射收支和监测作物和植被状况至关重要,也是温室效应和大气与地面能量通量间的重要指标;此外,可在气候、大气和地表模式中同化使用,以估计显热通量和潜热通量。

云顶温度/云顶高度/云顶气压 用先进静止轨道辐射成像仪红外通道数据反演获取每个有云像素点的云顶的温度、高度和气压信息。这些云产品是生成其他下游产品的先决条件,包括云光学/微物理产品等。天气预报员可使用这些云产品确定云的增长/消亡和降水的可能性。产品的其他业务应用包括机场天气预报、为地面观测系统补充高层云信息、为数值天气预报提供云的初始化信息。

云粒子半径与云光学厚度 用相同的算法,白天使用先进静止轨道辐射成像仪的可见光和近红外通道数据,夜间使用红外通道数据,云光学和微物理特性算法将同时生成云光学厚度产品和云粒子半径

产品。两个产品共同提供有关云辐射性质的有价值信息;这两个属性将为全球气候模式提供有关地球能源和辐射收支的高质量数据,从而提高气候预测能力。

云相态 用先进静止轨道辐射成像仪红外通道数据生成4种不同的云相态:暖液态水($>0\text{ }^{\circ}\text{C}$)、过冷液态水、混合和冰。产品是生成其他下游产品的先决条件,包括云顶高度、云光学属性、雾检测等产品;可使气象学家更好地监测和跟踪云内水汽成分的变化,提高航空气象中的结冰预测能力,并改善极端天气预警;也可用于如极端天气预报和热带气旋强度估计等气象业务应用。

地表下行长波辐射 提供地球表面热红外辐射通量向下的分量,该产品仅在先进静止轨道辐射成像仪晴空像素进行计算;地表上行长波辐射产品提供地球表面热红外辐射通量向上的分量,该产品仅在先进静止轨道辐射成像仪晴空像素进行计算。该产品是确定地表温度场的重要要素,并对海洋和大气环流产生极大影响;地表下行长波辐射产品与地表上行长波辐射、地表入射太阳辐射和反射短波辐射共同构成了描述地球表面能量收支的四个关键要素。产品也可为气候预测模式提供更准确的数据。

反射短波辐射 用先进静止轨道辐射成像仪多个可见光和红外通道数据计算通过大气顶部离开地球的短波辐射的总量。产品可在气候模式和预测中使用。

气溶胶光学厚度 用先进静止轨道辐射成像仪多个通道数据测量大气顶部晴空像素的反射特性,然后将这些反射特性作为气溶胶模型的输入,计算表面反射率和气溶胶性质。产品提供的信息可在空气质量、能见度和航空预测等应用领域使用,此外可为气候模式提供有价值的信息,有助于检测和预测气候变化。

对流初生 采用目标识别和跟踪技术追踪移动的云团,利用多光谱阈值监测云团的发展。产品将使天气预报员能识别出哪里正在发生对流、哪里可能发生对流、哪里已经发生对流;天气预报员可用该产品提供的信息制作潜在极端天气的预测和预警。

火点/热源点检测 用先进静止轨道辐射成像仪数据识别火点位置并获取亚像素火焰特征。预报员能用该产品监控大火,更重要的是可监控火的快速变化趋势。产品在消防工作中可为预测应用提供重要信息。

低云/雾检测 用先进静止轨道辐射成像仪空间和光谱信息识别雾或低层云。天气预报员可用该产品制作和发布与交通和航空相关的雾预测和预警信息,有助于减少因雾造成的汽车交通事故和飞机事故。

地表比辐射率 是地表辐射的能量与黑体在相同温度情况下辐射的能量的比值。地表比辐射率产品仅在先进静止轨道辐射成像仪晴空区域的地面像素进行计算,通过检测地表温度的变化估计地表发射率。产品是数值天气预报模式中同化红外辐射的重要输入。

地表反照率 结合大气校正和表面双向反射分布函数(BRDF)建模,生成地表反照率和地表反射率。该产品是能源收支的关键参数,气象学家通过该产品的变化趋势制作地表性质变化(如雪或冰盖以及植被的变化)预测预警;气候研究者可由该产品获得与地球总辐射收支相关的宝贵的高分辨率数据。

对流层顶折叠 在对流层高层高空急流附近有一个极地、副热带与平流层空气非地转辐合区,在该区域常会有气流扰动,这种扰动称为对流层顶折叠。这些特征在卫星观测的水汽云图中非常明显,常表现为大尺度的亮温梯度分布。对流层顶折叠区是指由该边界延伸一定距离至湿空气团的区域。对流层顶折叠检测产品用于指示这些区域在大气中的位置,并识别出最可能给飞行带来扰动的区域。用对流层高层水汽通道数据计算对流层顶折叠的水平分布,另外用数值天气模式作为辅助计算对流层顶折叠在大气中垂直方向的分布特征。产品的四个关键输出是对流层顶折叠高低空边界,以及两个危险飞行方向,即最易遭遇中等-强扰动的方向。

闪电探测 用FY-4卫星闪电探测仪数据监测闪电,生成闪电监测产品。闪电探测产品有助于天气预报员识别极端天气,如识别迅速加剧的雷暴,并能准确及时地发出雷暴和龙卷风警报。

2 FY-4A 星应用前景

2.1 天气

气象卫星作为天气观测的重要技术手段,由于其全天时的观测特点,在天气预报中的作用已越来越重要和不可替代。FY-4A星兼具高频次、高分辨率、垂直探测和机动加密探测能力,可极大提升暴

雨、台风、强对流等灾害性天气的监测分析预报能力^[8]。其高频次和高分辨率的探测能力可更准确地把握暴雨/暴雪云团、台风云团、强对流云团的发生发展消亡演变过程,尤其有助于提高台风定位、定强精度和闪电监测能力。其云识别分类产品、降雨估计、闪电监测、雾检测、沙尘检测、海表温度、云导风等定量反演产品,可极大增强暴雨、暴雪、台风、强对流、海雾、沙尘暴等灾害性天气预报的客观定量监测分析预报能力。其垂直探测能力可提供高时空分辨率的大气三维温度和湿度结构分析,弥补常规探空资料的不足,延伸大气探测能力至人烟稀少地区和广阔海洋,从而改进数值预报初始场,提高数值预报模式精度和天气预报的精细化能力;同时利用其反演获得的大气不稳定指数等产品,可提前数小时发现暴雨和强对流等中小尺度天气系统发生前环境条件的变化,分析极端天气可能出现的蛛丝马迹,直接服务于短临天气预报预警。其机动加密监测能力则有助于加强对高影响或关键区域灾害性天气事件的高频次持续监测能力,提升高影响或关键区域重大灾害性天气事件的预警响应处置能力,为及时滚动发布相关重大灾害性天气事件的预警信息提供基础监测信息和重要技术保障。

2.2 数值预报

卫星红外高光谱探测资料在数值天气预报中已得到广泛应用,同时被证明是对预报效果有重要影响的一类卫星遥感资料,包括高光谱红外大气探测仪(AIRS)、干涉式超高光谱红外大气探测仪(IA-SI)、穿轨迹红外探测器(CrIS)等红外高光谱探测仪器均搭载于极轨气象卫星,其时间分辨率为12 h左右。世界上首次在静止卫星上装载的干涉式红外大气探测仪将实现对我国及周边地区高频次、间隔仅16 km的高空间分辨率、高光谱分辨率的大气温湿探测,弥补陆地探空站间隔约200 km、每天探测2次的严重不足,将极大改进数值预报初始场,从而提高数值天气预报精度。实现FY-4A星干涉式大气垂直探测仪辐射率资料、成像仪晴空水汽辐射率资料,以及云导风产品、云量等产品在全球和区域同化和预报系统(GRAPES)中的应用,对特别是强对流、飑线、雷暴等短生命史、影响大的灾害性天气预报,以及台风等海上系统发生和发展的预报有重要应用价值。

2.3 气候

与已在我国气候业务中应用的极轨卫星产品相比,FY-4A星产品具空间分辨率精细和时间观测频率密集的显著特点,将在气候和气候变化应用的诸多领域发挥重要支撑作用。

a) 关键气候要素监测服务

基于FY-4A星数据建立亚洲季风系统监测业务产品,开展以海表温度、大气水汽含量、大气水汽输送、大气射出长波辐射产品为主的亚洲季风爆发与结束,以及我国主要季风雨带进程等关键现象的多层面、立体化气候监测应用服务。

b) 气候模式定量化应用

通过开展基于FY-4A星陆表温度、土壤湿度、积雪覆盖、海表温度等数据产品为主的陆面和海洋关键要素的同化应用,实现FY-4A星产品在我国业务气候模式中的定量化应用,提升业务气候模式关键下垫面变量和参数的模拟准确性和精度,从而提升我国业务气候模式对东亚地区乃至全球次季节以上尺度短期气候预测业务水平。

c) 气候灾害监测评估服务

针对高温、干旱、洪涝、雪灾、海冰变化、冰川消融等关键气候灾害,基于高分辨率FY-4A星数据可开展重大气候灾害的持续性监测与风险评估,结合台站监测,定量分析各类气候灾害近期和长远影响。

d) 生态脆弱区监测评估服务

在我国北方典型荒漠化区域、农牧交错带、三江源、石漠化等生态环境脆弱区,基于FY-4A星产品进行气候和气候变化影响评估分析,开展不同生态典型区植被现状、距平、历史曲线分析,定量评估生态环境质量,分析全球气候变化对我国典型生态脆弱区的综合影响。

e) 气候资源监测评估服务

基于FY-4A星,可建立高时空分辨率的大气风速和净入射短波辐射产品的精细化时空分布数据集,从而为我国气候尺度的风能和太阳能资源监测和评估提供高时空分辨率的核心基础数据。进一步结合业务气候模式模拟和预报,一方面提升中国区域现有气候资源数据产品的精度,另一方面通过为模式预报提供基础数据信息,可有效改善对风能、太阳能资源的预测能力,为国家可再生能源政策制定及精细化能源规划和布局提供合理的气候依据。

2.4 生态环境

随着我国社会经济的快速发展,出现了如水土流失、土地沙化、草地退化、全球气候变暖背景下气象灾害增多等诸多生态问题,严重制约经济社会的可持续发展。卫星遥感是开展生态监测与评估的主要数据源,新一代静止气象卫星FY-4卫星也将依托其高时空分辨率的优势在生态监测领域发挥重要的作用。

与FY-2卫星相比,FY-4A星的先进静止轨道辐射成像仪空间分辨率有6倍的提升,可动态获取较高精度的陆地生态环境相关参数和信息,为开展草原、森林、内陆水体和湿地、荒漠、城市等典型生态系统监测与评估提供数据支撑。基于FY-4A星的先进静止轨道辐射成像仪数据,能监测植被变化,提取草原及荒漠面积、植被覆盖度的信息,提供高精度的积雪覆盖信息及雪灾监测和评估、森林与草原火情监测、大型湖泊水体范围提取、干旱监测、内陆湖泊蓝藻水华分布与强度变化动态监测、城市热环境的时空分布和动态变化监测等。

FY-4A星资料在大气环境监测评估中也将发挥积极作用,利用FY-4A星可定量反演气溶胶光学厚度,动态监测沙尘范围和强度、大雾范围和雾区光学厚度、霾的分布等信息等,与风云三号(FY-3)卫星、地基观测等多源数据结合,为开展大气环境的实时监测与评估提供观测支撑。

2.5 专业气象服务

FY-4A星产品在新能源、电力、交通、航空等国民经济重点领域的应用,将很大程度拓宽专业气象服务基础数据来源,实现“天基、空基、地基”立体式气象监测数据在专业气象服务领域的综合应用,提高专业气象服务技术水平。

在新能源领域,基于FY-4A星产品可将太阳能资源评价数据的空间分辨率由原来的气象台站插值提高到4 km乃至1 km,改善太阳能资源分布图谱和总量计算的精细化程度,有助于国家制定太阳能开发利用政策和发展规划,利于发电企业更科学合理地选择太阳能电站的选址、设计和管理,提高太阳能资源利用率。在交通领域,基于FY-4A星产品可推算道路路面温度,进行路面极端高低温的实况分析,以及低能见度等不利天气状况的监测,为道路行车安全和管理提供技术支撑。在航空领域,基于FY-4A星产品通过多源数据融合系统可开发出反

映真实大气的高分辨率实况格点产品,基于此产品可进一步开发出飞机航线上的对流有效位能、抬升指数、积冰层、飞机颠簸指数、抬升凝结高度等,为通用航空、航空气调度、飞行安全等提供重要参考。在电力领域,基于FY-4A星产品可监测雷击、火险等灾害性天气,并实现短时临近预警,为电力检修和安全生产提供参考。

2.6 人工影响天气

FY-4A星监测及云特性反演产品在人工影响天气领域有广阔的应用价值。主要有:将高时空分辨率、多光谱的观测资料,结合全国实时探空和地面观测,可开发满足人工影响天气业务需求的FY-4A星云结构特征和云降水物理过程反演产品,形成对云结构特征及其演变规律的实时监测能力,这些监测和反演产品对建立我国各类云系人工影响天气作业概念模型和作业指标判据将发挥关键作用;将在云模式预报检验、大气水循环和云水资源、人工增雨开发潜力评估等研究中得到应用;将在人工影响作业条件预报检验、作业条件监测识别预警、作业方案设计、作业跟踪指挥,以及作业效果检验等人工影响天气实时业务的各业务环节发挥重要作用;将在各地人工增雨、人工防雹,以及人工消减雨等各类人工影响天气服务实践中发挥关键作用。

2.7 空间天气

FY-4A星空间环境探测器数据可用于灾害性空间天气事件的监测,并对太阳活动、地磁环境、电离层和高层大气环境,以及卫星运行环境开展预报服务。高能粒子探测数据可直接用于预警一些潜在空间天气威胁,太阳高能质子(大于10 MeV)事件实时监测预警;高能电子(大于2 MeV)流量数据可用于计算卫星仪器发生充放电现象的概率,为卫星仪器正常运行监测提供服务;粒子的投掷角分布则有助于进一步了解同步轨道粒子的动力学过程,提高对辐射带环境的理解和认识;同步轨道的磁场探测数据不仅可验证全球磁场模型,同化到磁场模型中支持高精度磁场模型构建,还能用于评估地磁活动水平,估算卫星是否穿越磁层顶和磁激波,或为一些空间天气数值预报模型提供输入,促进对太阳风-磁层相互作用过程的科学理解;可获得卫星充电、单粒子事件、辐射剂量和碎片等预警和预报指数,并在卫星或载荷状态异常时进行综合分析,甄别是否由

空间天气事件引起,为卫星在轨安全运行提供保障等。FY-4A 星空间天气监测和预报预警将为能源、通信、航空、航天等多领域提供服务。

3 FY-4A 星在轨测试期间应用

FY-4A 星及其地面应用系统测试计划持续 1 年。为尽快发挥效益,采取了边调试边试用的测试方式。在轨测试期间,正值春夏转换,天气形势复杂,沙尘、暴雨强对流、台风等灾害天气轮番登场。FY-4 卫星地面应用系统利用 FY-4A 星获取的测试资料,生成测试产品,针对性地开展了试验应用。目前应用 FY-4A 星监测到的典型灾害天气过程包括:2017 年 5 月 3 日至 7 日北方地区最严重沙尘过程、6 月 20 日至 24 日华北特大暴雨、6 月底至 7 月初南方持续降水、1 702 号台风苗柏和 1 703 号台风南玛都;同时 FY-4A 星还对“一带一路”国际合作高峰论坛专项气象服务保障开展了专项观测支持。

FY-4A 星应用中显示出多通道扫描成像辐射计具识别沙尘细节纹理更清晰、台风内部中小尺度云系结构更明显、能解析暴雨天气不同层次水汽输送等新增能力;闪电成像仪观测到的国内外闪电资料,也对强天气的监测应用有很好的指示作用。在上述天气过程和气象服务保障中,FY-4A 星体现出公众认可度高、用户期待值大的特点,预示未来投入业务应用后的明显应用前景,在 2017 年下半年,将

重点开展产品测试和试验使用,FY-4A 星新仪器、新产品的巨大应用潜力,将随着测试过程的进一步展开,得到更加充分的发挥。预计卫星和地面应用系统将于 2017 年底具备投入业务使用能力。

FY-4A 星三通道可见光彩色合成图像如图 6 所示。该图像由于利用了 FY-4A 星 500 m 高分辨率的可见光通道,其分辨率较现有 FY-2 卫星提高 6 倍,时间频次提高 1 倍。2017 年 5 月 4 日凌晨对该图像产品的判识发现明显的沙尘暴信息,随着气旋云系向东移动,沙尘影响范围明显向东扩展,华北大部、内蒙古大部、陕西北部、甘肃东部、宁夏大部、黑龙江北部与内蒙古北部交界处、黑龙江西南部等地有明显沙尘分布,东北西部沙尘区有云覆盖。经估算,卫星可视的沙尘监测面积约 19.2 万 km^2 。

FY-4 卫星可见光近红外通道伪彩色合成图像,利用了 FY-4 卫星新增的卷云通道,可清晰地识别区域水云和冰云,这对航空气象、强天气分析,以及云团发生发展的跟踪有重要的应用价值。2017 年 6 月 25 日 15:45 的 FY-4A 星合成图像如图 7 所示。该时间段西南地区东部至长江中下游维持一条梅雨锋雨带(图中蓝色调和白色调云团),在雨带南侧的湖南南部、浙江南部和福建北部有强对流云团发展,上述地区出现了强降水。图 7 中:强降水区域与对流旺盛发展到出现冰云(图中蓝色调云团)的区域非常一致。

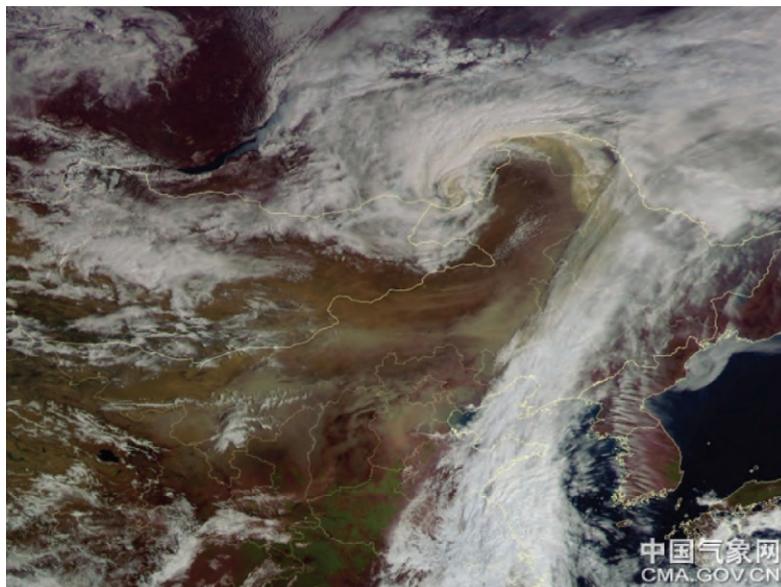


图 6 FY-4A 星三通道彩色合成图像

Fig. 6 Color synthesis picture of three channels by FY-4A satellite

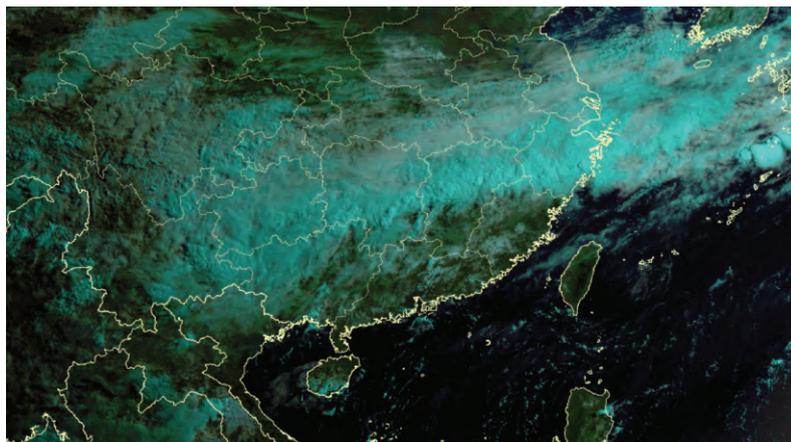


图7 FY-4A 星伪彩色合成图像

Fig. 7 Pseudo-color synthesis picture by FY-4A satellite

4 FY-4 卫星发展

FY-4 光学星在总体技术上与国际同期静止气象卫星处于同等水平,并在大气垂直探测方面具先行发展的优势。FY-4A 星作为科学实验卫星,主要用途是验证新技术,发展新应用^[9]。与 MTG 和 GOES-R 系列卫星等相比,该星的成像仪器的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率尚有一定差距^[10]。为更好地满足我国气象事业对静止气象卫星观测资料的需求,并与国际接轨建立具有观测数据兼容的卫星星座,FY-4 后续光学系列业务卫星的红外成像空间分辨率将逐步达到 2 km,全圆盘观测时间分辨率达到 1 min;携带快速成像仪,可获取真彩色图像,最高可见光分辨率 250 m,2 000 km×2 000 km 区域成像时间为 1 min;进一步提高探测仪的空间分辨率,保持中国在静止轨道红外高光谱大气垂直探测的先行优势,并不断提高应用效益;静止轨道闪电成像仪的性能将与 MTG,GOES-R 基本一致。预计在 2020 年前后,FY-4 光学系列卫星的性能将全面达到和部分超越国际先进水平。

5 结束语

我国 FY-4 光学星系列的科研实验卫星的成功发射,在轨测试所取得的成果表明,星地总体方案正确,实现了全部功能,主要技术指标达到或优于设计值,将在 2018 年全面投入试用,特别是在台风、暴雨、洪涝、干旱等自然灾害的监测中发挥重要作用,提高天气监测和预报水平,为减少人民生命财产损失和社会发展做出更大的贡献。随着后续卫星的发射,尤其是微波探测卫星的发展,FY-4 卫星将处于

国际领先水平^[9]。为农业、林业、水利、海洋、环境、交通、能源、航空航天、国防建设、科研等各领域,为我国小康社会建设、生态文明建设和“一带一路”战略提供更坚实的支撑和保障服务。

参考文献

- [1] YANG J, ZHANG Z, WEI C, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites-FengYun4 (FY-4)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2016, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0065.1.
- [2] LU F, SHOU Y, Channel simulation for FY-4 AGRI [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Vancouver: [n. l.], 2011: 3265-3268. 1.
- [3] 张志清,董瑶海,丁雷,等.我国首颗第二代静止气象卫星风云-4 升空[J].国际太空,2016(12): 6-12.
- [4] 徐建平,张志清.各国静止气象卫星的发展[J].气象科技,2001,29(2): 11-20.
- [5] LU F, ZHANG X, XU J. Image navigation for the FY 2 geosynchronous meteorological satellite[J]. J Atoms Ocean Technol, 2008, 25(7): 1149-1165.
- [6] 张如意,李卿,董瑶海,等.静止气象卫星观测系统发展设想[J].上海航天,2012,29(5): 7-13.
- [7] 杨军,许健民,董超华.风云气象卫星 40 年:国际背景下的发展足迹[J].气象科技进展,2011,1(1): 6-13.
- [8] 张晓虎,陆风,窦芳丽,等.国外地球同步轨道气象卫星成像观测模式发展分析[J].气象科技进展,2016,6(1): 124-128.
- [9] 董瑶海.风云四号气象卫星及其应用展望[J].上海航天,2016,33(2): 1-8.
- [10] 陆风,张晓虎,陈博洋,等.风云四号气象卫星成像观测模式及其应用前景[J].海洋气象学报,2017,37(2): 1-12.