

陆风 张晓虎 陈博洋 等.风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J].海洋气象学报,2017,37(2):1-12.  
Lu Feng Zhang Xiaohu ,Chen Boyang ,et al.FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects [J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(2):1-12. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.001.( in Chinese)

## 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景

陆风 张晓虎 陈博洋 刘辉 吴荣华 韩琦 冯小虎 李云 张志清  
(国家卫星气象中心,北京 100081)

**摘要:** 风云四号是中国新一代静止轨道气象系列卫星,该系列卫星的设计目的是满足中国气象局 2020 年前后的业务应用和服务需求。风云四号系列的首发星为科研试验星,代号 FY-4A,已于 2016 年 12 月 14 日在西昌卫星发射中心成功发射,从 FY-4B 开始,风云四号系列卫星将提供业务服务。成像是风云四号系列卫星的核心载荷之一,其成像性能比目前使用的风云二号系列卫星在时间空间分辨率、光谱通道等方面有显著提升。本文将就该仪器的工作特点、观测模式设置、光谱通道的选取和特点进行介绍,由于 FY-4A 卫星正在进行为期一年的在轨测试,本文还将展示在轨测试图像。

**关键词:** 气象卫星; 风云四号; 成像; 光谱通道; 遥感

中图分类号: P414.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2017)02-0001-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.001

## FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects

LU Feng , ZHANG Xiaohu , CHEN Boyang , LIU Hui , WU Ronghua ,  
HAN Qi , FENG Xiaohu , LI Yun , ZHANG Zhiqing  
(National Satellite Meteorological Center , Beijing 100081 , China)

**Abstract** Fengyun 4A ( FY-4A ) , the R&D mission for Chinese second-generation geostationary meteorological satellite series was successfully launched at 00: 11 BST on December 14 2016 at Xichang Satellite Launch Center , southwest China's Sichuan Province. From FY-4B , Chinese second-generation geostationary meteorological will be operational. To satisfy CMA weather forecast and service requirement toward 2020 , the Advanced Geosynchronous Radiation Imager ( AGRI ) is one of the most important payload onboard the Chinese second-generation geostationary meteorological satellite. The AGRI will provide a significant advancement over the current FY-2 VISSR such as more spectral channels , faster imaging and higher spatial resolution. In this paper , the FY-4 working mode , channel setting and potential application are discussed. As FY-4A is under one year post launch test , which will end by December 2017 , some test images of FY-4A are presented.

**Key words** meteorological satellite; FY-4; imaging; spectral channel; remote sensing

收稿日期: 2017-06-06; 修订日期: 2017-06-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目( 2009AA12Z50 ); 高分辨率对地观测系统重大专项( 30-Y20A02-9003-15/16-1 ); 国家自然科学基金项目( 41575048 , 61527805 , 41175023 )

作者简介: 陆风( 1973— ) 男, 博士, 研究员, 风云二号/四号卫星地面应用系统副总设计师, 主要从事气象卫星地面应用系统架构设计、遥感仪器指标优化及成像模拟、多源融合定量遥感以及遥感应用评估工作, lufeng@cma.gov.cn。

## 引言

中国“风云”气象卫星包括两个系列,即太阳同步轨道气象卫星(又称极地轨道气象卫星)和地球静止轨道气象卫星(又称静止气象卫星),通过二者的相互结合和补充,建立一套全面的气象卫星业务运行体系和相应的地面数据接收处理和应用系统,观测能力覆盖全球,以满足全国各部门的气象、环境观测和防灾减灾的需求,在国民经济建设和防灾减灾中发挥了重要作用。中国气象卫星是全球综合地球观测系统的重要成员,世界气象组织已将目前业务运行的中国气象卫星纳入全球业务应用气象卫星序列,为区域乃至全球许多国家的经济发展做出了重要贡献。目前中国业务气象卫星包括第二代极轨气象卫星风云三号系列和中国第一代静止轨道气象卫星风云二号系列。

国际上,美国第一颗业务静止气象卫星 GOES-1 于 1975 年 10 月发射,目前美国静止轨道业务气象卫星系列已发展到第四代。GOES-1 至 GOES-3 为第一代,装载了可见光红外自旋扫描辐射计(VISSR);GOES-4 至 GOES-7 为第二代,卫星姿态控制仍为自旋稳定,装载了可见光红外自旋扫描辐射计(VISSR)和大气探测器(VAS);GOES-8 以后为第三代,该系列卫星的主要观测能力提升体现在卫星姿态控制改为三轴稳定,装载了成像仪和独立的大气垂直探测器。成像仪有 5 个通道,垂直探测仪有 19 个通道,成像与垂直探测相互独立且同时进行。美国第四代气象卫星系列的第一颗卫星为 GOES-16(GOES-R),其主要观测仪器为 16 通道成像仪<sup>[1]</sup>,闪电成像仪器和空间天气监测仪器,已于 2016 年 11 月 19 日成功发射。

日本静止轨道气象卫星经历了三代。第一代 GMS 系列,相当于美国第二代气象卫星,采用自旋稳定工作方式。第二代 MTSAT 系列,采用三轴稳定工作方式,同时提供气象和航空管制服务。第三代 HIMWARI 系列,是专用气象卫星,目前已经成功发射两颗,卫星主要观测仪器成像仪从美国购买,主要功能和性能与美国 GOES-R 卫星搭载的 ABI 成像仪相当<sup>[2]</sup>,具有 16 通道的成像能力。

欧盟的静止气象卫星也经历了三代,其第一颗静止轨道气象卫星 Meteosat-1 于 1977 年 11 月发射。目前欧洲业务使用的是欧洲第二代静止气象卫星 MSG 系列,该系列卫星仍然采用自旋稳定工作方式,具有 12 个通道<sup>[3]</sup>。欧洲第三代静止轨道气象

卫星正在研制,计划将分为成像系列(MTG-I)和探测系列(MTG-S),成像系列卫星计划 2018 年发射,探测系列卫星计划于 2022 年以后发射。

中国静止轨道气象卫星发展正处于从第一代向第二代升级的发展阶段,目前中国业务应用的静止轨道气象卫星风云二号系列是中国第一代静止气象卫星,已发射 7 颗,即风云二号 A/B/C/D/E/F/G,前 2 颗是试验星(风云二号 A/B),5 颗业务星(风云二号 C/D/E/F/G)。其中风云二号 A 星于 1997 年 6 月 10 日发射成功,风云二号 B 星于 2000 年 6 月 25 日发射成功,姿态均采用自旋稳定工作方式,主要仪器是三通道扫描辐射计,设计寿命 3 年。从风云二号 C 星起,扫描辐射计的观测通道从 3 个通道增加到 5 个,仪器性能比试验星有较大改进与提高<sup>[4]</sup>。风云二号 C 星、D 星、E 星、F 星和 G 星已分别于 2004 年 10 月 19 日、2006 年 12 月 8 日、2008 年 12 月 23 日、2012 年 1 月 13 日和 2014 年 12 月 31 日发射。风云二号静止气象卫星的光谱通道选择,观测模式设计与日本 GMS,美国第二代静止轨道气象卫星相当,进入 21 世纪以来,风云二号的观测要素、观测时效与业务应用需求间的差距越来越大,因此启动了中国新一代静止轨道气象卫星风云四号系列的研制,该系列的应用目标是面向 2020 年前后中国气象局气象观测需求,卫星设计与美国最新一代气象卫星 GOES-R 系列相当<sup>[5-6]</sup>。通过应用需求牵引和技术进步,风云四号系列卫星全新设计了适合中国气象应用的卫星观测能力和仪器。由于风云四号气象卫星及地面应用系统均为全新研制,按照中国气象局和国防科工局批准的卫星及产品测试计划, FY-4A 拟于 2017 年 7 月完成卫星及仪器性能测试,交付中国气象局;计划随后即开展地面系统和产品测试,2017 年 12 月完成全部测试任务,具备投入业务服务能力。

## 1 风云四号静止轨道气象卫星

风云四号系列是中国新一代静止气象卫星,风云四号卫星采用 SAST5000 平台,六面柱体结构,具有对地面积大、质心低等优点。采用单太阳能电池翼方案,预留完整的一侧用作载荷辐射制冷器的散热面。采用三轴稳定姿态控制技术,与自旋稳定方式平台相比可显著提高对地观测效率,并为大气垂直探测和闪电观测提供必备条件。采用双总线体制,星务管理由低速 1553B 总线实现,载荷观测数据采用 Space-Wire 总线传输,配置灵活、可靠性高。卫

星平台包括结构、热控、姿态轨道控制、推进、电源、测控、数管、总体电路、数传、转发、数据收集等分系统。风云四号卫星设计寿命 7 年,发射质量约 5 400 kg。

FY-4A 是中国第二代静止轨道气象卫星风云四号系列的首发星,于 2016 年 12 月 11 日成功发射。标志着中国静止轨道气象卫星实现了从第一代(风云二号)向第二代(风云四号)的跨越。卫星设计寿命长达 7 年,由于 FY-4A 的观测仪器、应用系统和产品科学反演算法均自主发展,FY-4A 被定位为科研实验卫星,通过这颗卫星的使用,全面测试中国第二代静止轨道气象卫星及应用技术。FY-4B 开始,风云四号系列将进入业务卫星阶段,计划 2020 年前后,全面取代现役的风云二号系列业务气象卫星。图 1 列举了 2020 年前后国际气象卫星的分布图。

FY-4A 装载了多种观测仪器,包括先进的静止轨道辐射成像仪(Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI)(以下简称成像仪)、干涉式大气垂直探测仪(Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS)(以下简称探测仪)、闪电成像仪(Lightning Mapping Imager, LMI)(以下简称闪电仪)和空间环境监测仪器包(Space Environment Package, SEP)等。

相比现有风云二号静止卫星来说, FY-4A 装载的多通道扫描成像辐射计和空间天气载荷显著提升

了观测性能,其中多通道扫描成像辐射计的成像观测通道从 5 个扩展到 14 个,观测时效从半小时提高到 15 分钟,最高空间分辨率从 1.25 km 提高到 500 m。与国际同类卫星相比,风云四号 A 星成像仪 14 个成像通道与国际水平相当。



图 1 全球新一代气象卫星分布图  
Fig.1 Next-generation meteorological satellite constellation

FY-4A 装载的干涉式大气垂直探测仪在世界上首次建立静止轨道红外高光谱探测能力,可用于获取中国及周边区域高频次的大气温湿度三维结构信息。

FY-4A 装载的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。目前国际上只有美国新一代静止轨道气象卫星 GOES-R 搭载了闪电成像仪,用于对西半球美洲区域进行观测。

表 1 新一代静止轨道气象卫星仪器对比

Table 1 Payloads of current-generation geostationary meteorological satellites

	中国 FY-4A	美国 GOES-R	欧盟 MTG	日本 Himawari-8
多光谱成像	可见光/近红外:	可见光/近红外:	可见光/近红外:	可见光/近红外:
	空间分辨率	0.5~1.0 km	0.5~1.0 km	0.5~1.0 km
	中波/长波红外:	中波/长波红外:	中波/长波红外:	中波/长波红外:
	2.0~4.0 km	2.0 km	2.0 km	2.0 km
时间分辨率	15 min/全原盘	5 min/全原盘	10 min/全原盘	10 min/全原盘
通道数量	14	16	16	16
探测精度	0.2 K	0.1 K	0.1 K	0.1 K
垂直探测	光谱范围	700~2 250 cm <sup>-1</sup>		
	通道数量	1 648	无	仪器研制中
	光谱分辨率	0.625 cm <sup>-1</sup>		
空间分辨率	16 km			
闪电探测	光谱范围	777.4 nm	777.4 nm	777.4 nm
	观测间隔	2 ms	2 ms	2 ms
空间探测	观测要素	粒子/磁场	粒子/磁场/对日成像	无
发射时间	2016 年 12 月	2016 年 10 月	计划 2020 年以后	2016 年 12 月
				2014 年 10 月

## 2 风云四号成像光谱通道设置及成像观测模式

成像仪采用被动遥感的方式获取来自地气系统发射或反射/散射的电磁波辐射。在遥感技术中,光谱通道一般反映了传感器选择接收电磁波的能力。一台成像仪能接收几个通道的电磁波,就称为几通道成像仪。为了突出观测目标物的信息,同表2 新一代静止轨道气象卫星成像通道设置

Table 2 Channel settings of the new generation geostationary meteorological satellite imager

日本 Himawari-8 AHI				美国 GOES-R ABI				中国 FY-4A AGRI				中国 FY-2G VISSR			
通道号	中心波长/ $\mu\text{m}$	通道宽度/ $\mu\text{m}$	分辨率/ km	通道号	中心波长/ $\mu\text{m}$	通道宽度/ $\mu\text{m}$	分辨率/ km	通道号	中心波长/ $\mu\text{m}$	通道宽度/ $\mu\text{m}$	分辨率/ km	通道号	中心波长/ $\mu\text{m}$	通道宽度/ $\mu\text{m}$	分辨率/ km
1	0.455	0.05	1.0	1	0.47	0.04	1.0	1	0.47	0.04	1.0				
2	0.510	0.02	1.0												
3	0.645	0.03	0.5	2	0.64	0.1	0.5	2	0.65	0.2	0.5	1	0.725	0.3	1.25
4	0.860	0.02	1.0	3	0.86	0.04	1.0	3	0.825	0.15	1.0				
				4	1.38	0.03	2.0	4	1.375	0.03	2.0				
5	1.61	0.02	2.0	5	1.61	0.06	1.0	5	1.61	0.06	2.0				
6	2.26	0.02	2.0	6	2.26	0.05	2.0	6	2.25	0.25	2.0				
7	3.85	0.22	2.0	7	3.90	0.2	2.0	7	3.75H	0.50	2.0	2	3.75	0.5	5.0
								8	3.75L	0.50	4.0				
8	6.25	0.37	2.0	8	6.15	0.9	2.0	9	6.25	0.90	4.0				
9	6.95	0.12	2.0	9	7.00	0.4	2.0					3	6.95	1.3	5.0
10	7.35	0.17	2.0	10	7.40	0.2	2.0	10	7.1	0.4	4.0				
11	8.60	0.32	2.0	11	8.50	0.4	2.0	11	8.5	1.0	4.0				
12	9.63	0.18	2.0	12	9.70	0.2	2.0								
13	10.45	0.30	2.0	13	10.3	0.5	2.0	12	10.7	0.8	4.0	4	10.8	1.0	5.0
14	11.20	0.2	2.0	14	11.2	0.8	2.0								
15	12.35	0.30	2.0	15	12.3	1.0	2.0	13	12.0	1.0	4.0	5	12.0	1.0	5.0
16	13.30	0.2	2.0	16	13.3	0.6	2.0	14	13.5	0.6	4.0				

经过与国内外气象应用部门的讨论和交流<sup>[7]</sup>, 汇总得到的风云四号成像仪的成像观测的基本应用需求如下:

- 1) 满足每3小时1次的数值预报模式。
- 2) 满足预报员天气监测、分析、预测、预报的时间要求(具备10~15 min间隔的资料获取能力)。
- 3) 1小时1次的全圆盘观测,能够观测到对中国有影响的天气系统和印度洋云图信息,同时确保全圆盘历史资料的完整。
- 4) 具备及时响应紧急观测的能力,特别是对台风以及突发性灾害天气进行紧急观测时,观测时间分辨率不低于现有的风云二号。

考虑到由于中国处于东亚季风区,且汛期强天

时尽量减少非目标物(背景)以及传输路径上介质的影响,需要根据应用需要选取特定的观测通道。表2列出了国内外新一代静止轨道气象卫星成像通道设置,作为参考,也列出了中国风云二号气象卫星的成像通道。FY-4A搭载的14通道成像仪,通道选取与欧美日新一代气象卫星类似。随着风云四号系列的发展,未来的风云四号业务星,将进一步扩展成像观测的光谱通道和性能。

气和台风频发,冬季和夏季对气象卫星观测的需求差异较大,因此FY-4A卫星设计了常规观测、加密观测和应急观测三类成像观测模式,由于风云四号卫星及地面系统尚处于调整测试阶段,以下分别介绍初步拟定的卫星成像观测模式,这些观测模式通过卫星在轨测试确认后,将投入业务试运行,提供应用服务所需的卫星资料:

- 1) 常规成像观测模式。

每3小时1组风场成像观测,每次连续观测三幅全圆盘图像,全天8次,每天第一组风场成像观测时间为23:45:00:00:00:15。

每小时进行4次观测,整点为全圆盘,整点过15 min、30 min、45 min为北半球(在风场成像观测

时段,进行全圆盘观测),全天共计进行 40 次全圆盘(包含 8 次测风的 16 张全圆盘)观测,56 次北半球观测。

中国区域云图观测的时间间隔 15 min。

2) 加密模式观测模式。

每 3 小时 1 组风场成像观测,每次连续观测三幅全圆盘图像,全天 8 次,每天第一组风场成像观测时间为 23:45:00:00:00:15。

每小时进行 7 次观测(非风场成像观测时段),整点为全圆盘,整点过 15 min、22 min 30 s、30 min、37 min 30 s、45 min、52 min 30 s 为北半球(在风场成像观测时段,对应的时间进行全圆盘观测),全天共计进行 40 次全圆盘(包含 8 次测风的 16 张全圆盘)观测,112 次北半球观测。

非全原盘/测风观测时段,中国区域云图观测的时间间隔为 7.5 min。

全原盘/测风观测时段,中国区域云图观测的时间间隔为 15 min。

3) 应急模式观测时间模式。

每 3 小时 1 组风场成像观测,每次连续观测三幅全圆盘图像,全天 8 次,每天第一组风场成像观测时间为 23:45:00:00:00:15。

风场成像观测根据灾害监测预警需要,灵活制定观测区域开展应急观测,观测区域最小范围 1 000 km×1 000 km,观测时间间隔为分钟级。

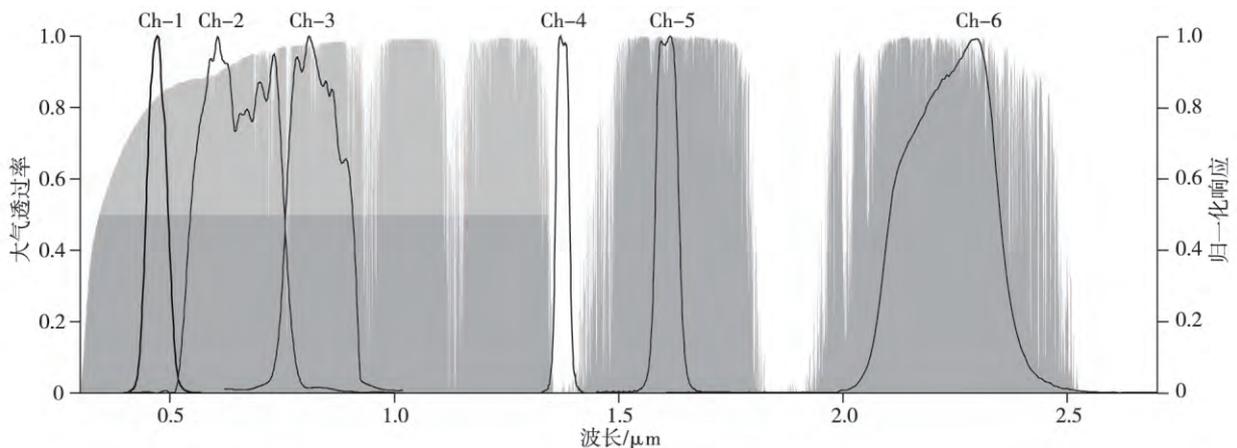


图 2 FY-4A 成像仪可见光及近红外通道光谱响应(图中大气透过率是基于美国标准大气<sup>[8]</sup>和逐线积分辐射传输模型计算得到)

Fig.2 FY-4A visible and near infrared channels spectral response (The atmospheric transmittance was calculated based on American standard atmosphere<sup>[8]</sup> and the line-by-line radiative transfer model)

### 3.1 可见光及近红外波段

FY-4A 成像仪在可见光近红外波段选取这 6 个观测通道的基本原理是,观测目标的反射率随波长

## 3 风云四号通道光谱特性及天气应用

FY-4A 成像仪的观测波段范围覆盖可见光到长波红外波段,其中波长 5  $\mu\text{m}$  以下的光谱通道,卫星观测到的主要信息是地表和大气反射/散射的太阳能量 5  $\mu\text{m}$  以上,卫星观测的主要信息是地球发射的红外辐射。

具体对于 5  $\mu\text{m}$  以下的成像通道,依照波长可划分为可见光近红外通道和中波红外通道,可见光近红外通道观测到的能量来自地表和大气反射的太阳能量,这些通道只有白天能观测到地物和大气/云的信息。而中波红外通道的能量同时来自地球大气反射的太阳能和自生发射辐射,因此中波红外通道昼夜均能获取观测图像。

对于 5  $\mu\text{m}$  以上的成像通道在红外谱段进行观测,昼夜都能获取图像,按照大气对红外辐射的吸收关系可分为大气窗区通道和大气吸收通道,大气窗区通道对地表和大气/云等目标的信息在传输路径上的吸收很小,而大气吸收通道,卫星观测到的信息是地表发射能量经过大气吸收/发射后到达卫星的能量,一般代表了一定厚度大气发出的能量情况。

下文分可见光及近红外波段、中波红外波段、红外吸收波段以及红外窗区波段对风云四号成像仪的 14 个通道及其观测特点进行讨论。

有明显变化,利用各种观测目标在不同波段的反射率差异,可以区分观测目标。图 3 给出了 4 种典型地物的光谱,将其与 FY-4A 成像仪在可见光近红外

波段的 6 个观测通道的光谱响应叠加,图中草、粗雪和海水的反射率信息来自 NASA JPL<sup>[9]</sup>,灰砂的反射率信息来自中国遥感卫星辐射校正场在甘肃敦

煌的观测<sup>[10]</sup>。可以看出,草、粗雪、灰砂和海水的反射率随波长显著变化。

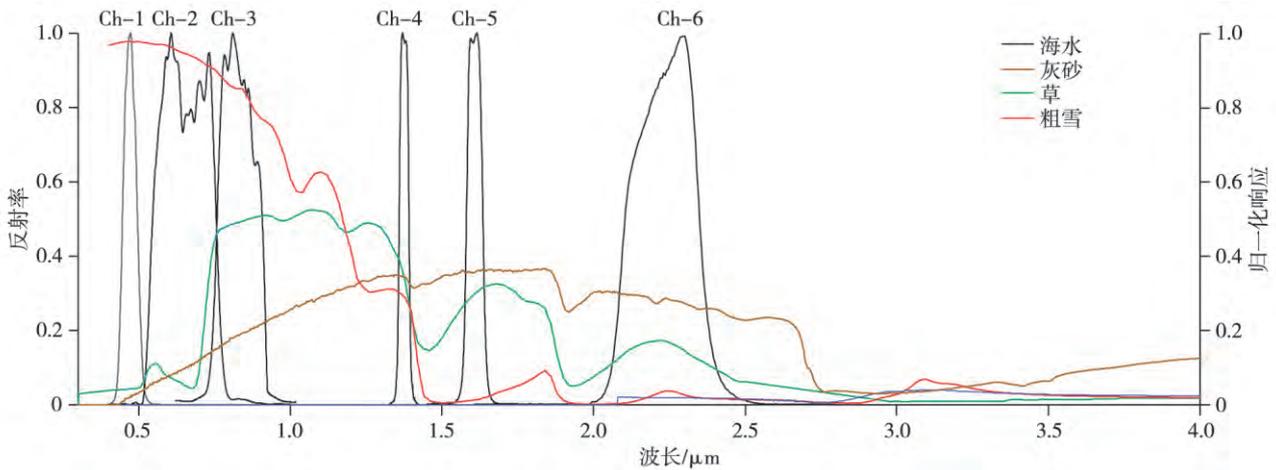


图 3 可见光近红外波段典型地物光谱图

Fig.3 Spectral reflectance of typical objects in visible and near infrared bands

图 4 给出了两幅风云二号卫星的可见光通道观测图像,这两张图像都处于可见光波段,但是光谱范围不同,其中 FY-2E 卫星的可见光波段 0.55~0.99 μm,而 FY-2F 卫星的可见光波段 0.55~0.75 μm。FY-2E 卫星的可见光波段同时涵盖包含了植被强反射信息的 0.7 μm 以上波段和植被弱反射的 0.7 μm 以下波段,因此图 5 左图红色箭头所指区域, FY-2E 无法识别植被地物,而图 5 右图箭头所指区域,可观察到一块明显的暗色区域,这块区域根据 IGBP 的土地分类,该区域由阔叶林覆盖<sup>[10]</sup>,FY-

2F 可见光图像成功识别到了植被信息,其原理是 FY-2F 选取的 0.55~0.75 μm 波段植被反射信息很弱。因此对比 FY-2E 和 FY-2F 可以看到,植被区 FY-2F 图像上要比 FY-2E 图像上显著变暗。可见光通道光谱范围调整后, FY-2F 及后续风云二号系列卫星仅有的一个可见光成像光可定性地识别地物的植被区域,而基于上述原理, FY-4A 设置了两个相关的可见光通道,即通道 2 和通道 3,这两个通道一个对植被反射信号不敏感,一个对植被反射信号敏感,可以开展植被相关定量遥感参数的获取。

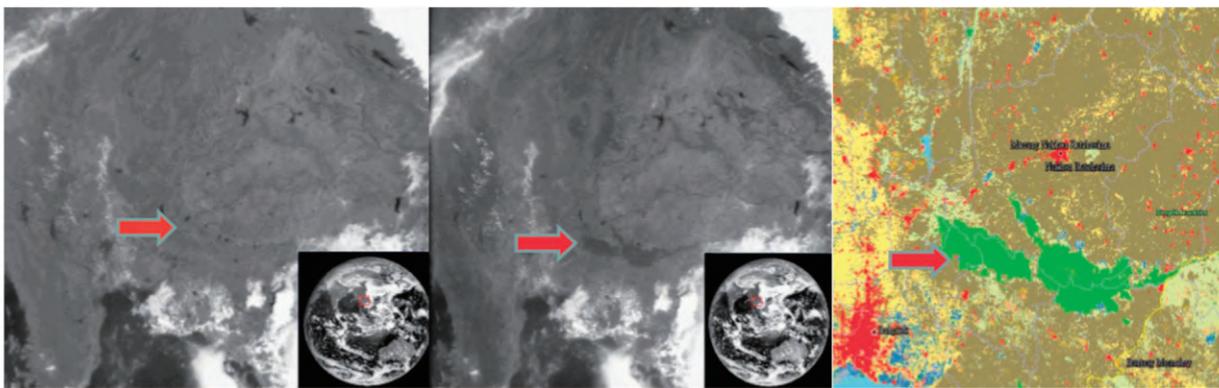


图 4 可见光通道通道成像(左图 FY-2E 成像光谱范围 0.55~0.99 μm,中图 FY-2F 成像光谱范围 0.55~0.75 μm,右图为 IGBP 土地分类图,红色箭头所指为阔叶林)

Fig.4 Visible channels images( Left image: 0.55~0.99 μm, Middle image: 0.55~0.75 μm, Right image: land cover type from IGBP global vegetation classification scheme, Red arrow region: broad-leaved forest)

图 4 给出了 FY-4A 在轨测试期间获取的成像仪可见光近红外通道图像。

通道 1 的波长范围 0.45~0.49 μm,主要用于昼间云、沙尘和气溶胶观测。

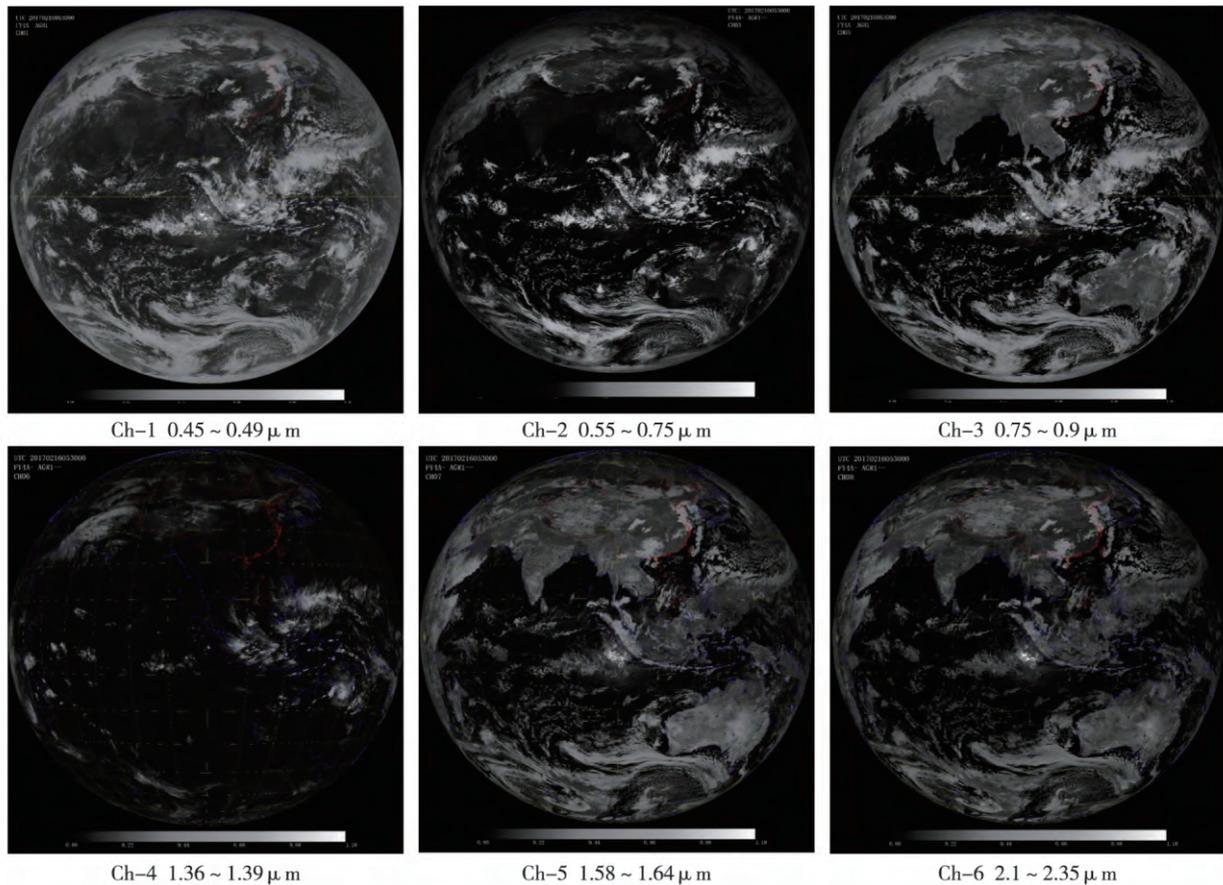


图 5 FY-4A 成像仪可见光近红外通道图像  
Fig.5 FY-4A visible and near infrared channels images

通道 2 的波长范围  $0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$ , 主要用于昼间云、沙尘、积雪等观测。FY-4A 该通道空间分辨率为  $500 \text{ m}$ , 而风云二号相应通道空间分辨率为  $1.25 \text{ km}$ 。

通道 3 的波长范围  $0.75 \sim 0.9 \mu\text{m}$ , 主要用于白天云、气溶胶、植被和海洋特性检测。由于植物在可见光和红外波段有显著的区别, 绿色植被的吸收在  $0.38 \sim 0.7 \mu\text{m}$  之间最大, 而  $0.7 \sim 1.3 \mu\text{m}$  波段, 绿色植被有高的反射和低的吸收, 因此通道 3 包含了强烈的绿色植被反射信息, 而通道 2 植被信息比较微弱, 将通道 2/3 相结合, 计算归一化植被指数可以有效反映植被生长信息。

通道 4 的波长范围  $1.36 \sim 1.39 \mu\text{m}$ , 该通道对冰晶粒子信息敏感, 用于卷云观测。

通道 5 的波长范围  $1.58 \sim 1.64 \mu\text{m}$ , 由于雪在  $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$  反射率极低, 而云在该通道反射率很高, 因此这个通道可以用于低云/雪识别和水云/冰云判识。

通道 6 的波长范围  $2.1 \sim 2.35 \mu\text{m}$ , 这个通道主

要用于卷云、气溶胶、粒子大小观测, 由于云粒子的大小和降水、云发展旺盛的程度直接相关, 因此该通道对强天气预警有重要作用。此外, 夜间也能用于火点识别。

正如前文所述, FY-4A 的可见光近红外通道观测能力与现有卫星相比有显著提升, 这些新增的观测通道不仅可以获取很多地物和大气定量遥感信息, 而且通过多通道合成, 可以有效地快速分析地物信息, 结合风云四号提供的  $15 \text{ min}$  全圆盘观测基础上生成的各种专题动画, 可以支持预报员的短临预报服务。在可见光通道应用中, 对流层中分子散射是遥感和辐射传输计算中的一项重要内容, 最为明显的范例是卫星遥感水色产品的计算处理。水色产品需要在蓝色谱段进行测量, 而这个谱段在晴朗大气条件下是分子散射影响最为明显。对于陆表遥感应用, 大气订正过程也需要移除分子散射的影响。由于分子散射依赖波长, 因此在 NDVI 的估算中分子散射会引起约  $0.10 \text{ NDVI}$  单位的变化; 分子散射也依赖于角度, 在合成彩色图像时也会产生

影响<sup>[11-14]</sup>。图6给出了经过大气订正的FY-4A可见光谱段多通道合成图,该图利用通道2,通道3和通道5的差异,反映了水体,云和地物信息<sup>[15]</sup>,由于水云在这3个通道的反射率接近,因此合成图像中为白色,而积雪和冰云的信息在通道5的反射率远远高于水,因此合成图像中,积雪和冰云区域为蓝色调,在制作这幅合成图像时,还对可见光通道进行了快速大气订正,消除了分子散射对可见光通道成像的影响。利用类似的方法,对可见光近红外通道进行组合,可以开展沙尘、云相态的快速变化跟踪。

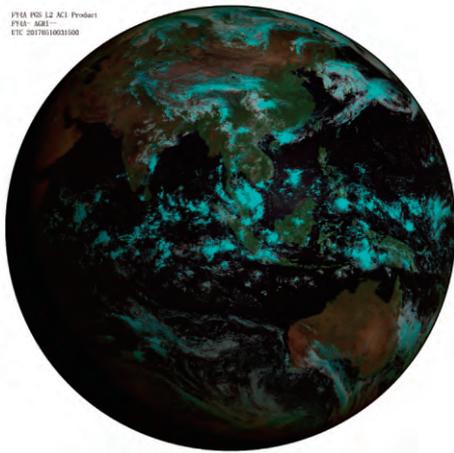


图6 FY-4A 2, 3, 5 通道合成图像  
Fig.6 FY-4A composite image of channels 2, 3 and 5

### 3.2 中波红外波段

图7给出了FY-4A成像仪中波红外波段2个观测通道的光谱响应,并将其与美国标准大气透过率叠加。

在3.5~4.0 μm的中波红外通道辐射率变化率

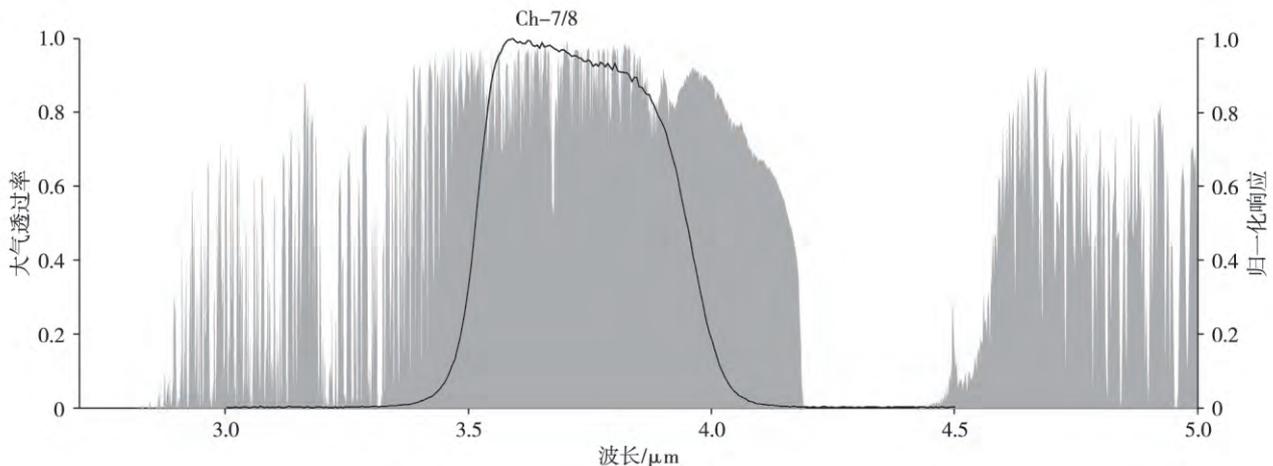


图7 FY-4A 成像仪中波红外通道光谱响应  
Fig.7 FY-4A medium infrared channel spectral response

随温度迅速增大,而两个长波红外通道(波长10.3~12.5 μm)则变化缓慢。当温度从300 K(典型地表温度)增至700 K(草本植物燃点530 K,木本植物燃点600 K)时,中波红外通道辐射率变化率增大250倍,而长波红外通道仅3倍左右。因此,选取3.5~4.0 μm的光谱通道可判识地面火点位置信息,长波红外通道可为火点监测提供火点温度/强度信息。由于中波红外通道的信息既有来自太阳的入射辐射信息,也有地表和云的发射信息,因此辐射能量变化幅度非常大,成像仪目前所采用的线性量化方式无法同时兼顾高温目标和低温目标观测应用,故FY-4A在3.5~4.0 μm波段设置了两个通道。

通道7的波长范围3.5~4.0 μm,空间分辨率2 km,动态范围选取在高温端,对火点高温以及白天的强太阳反射信号有很强的细节描述能力,图8中新加坡西侧的红色区域是白天海面的太阳耀斑区域,该区域海面反射的太阳信号很强烈,该通道很好地描述了这一强信号。而对于低温,通道7由于动态范围设置为高温区域,因此图像中的低温云区出现饱和和情况无法显示290 K温度以下观测目标的温度细节信息。

通道8的波长范围3.5~4.0 μm,空间分辨率为4 km,主要用于低云/雾的监测。通道8由于动态范围设置为常温和低温区域,因此图像中的云区细节明显,而海面耀斑强信号区域出现了图像的高温端饱和现象(图8右侧图像中新加坡西侧海面白色区域)。

### 3.3 红外吸收波段

图9给出了FY-4A成像仪在红外大气吸收波

段的 3 个观测通道的光谱响应,并将其与美国标准大气透过率叠加。这 3 个观测通道大气透过率都很低,其中通道 9 和通道 10 位于大气的水汽吸收带,通道 14 位于大气的二氧化碳吸收带。

通道 9 的波长范围 5.8~6.7  $\mu\text{m}$ ,显示对流层高层的水汽分布特征。

通道 10 的波长范围 6.9~7.3  $\mu\text{m}$ ,显示大气对流层中层的水汽分布特征。

通道 14 的波长范围 13.2~13.8  $\mu\text{m}$  位于大气中二氧化碳吸收带,对大气的二氧化碳吸收信息敏感,主要反映了大气中的云,对流层中低层以及地表信息。

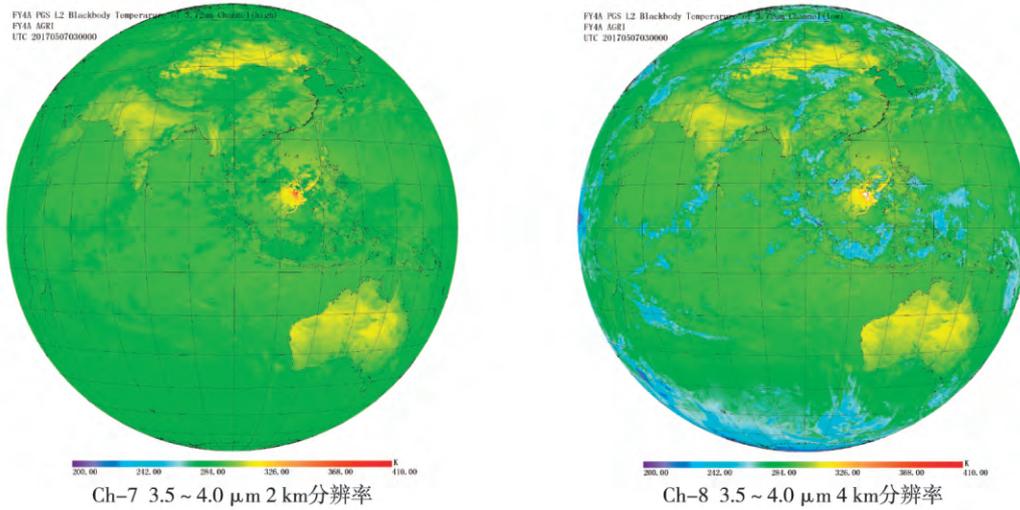


图 8 风云四号卫星中波红外通道图像  
Fig.8 FY-4A medium infrared channel images

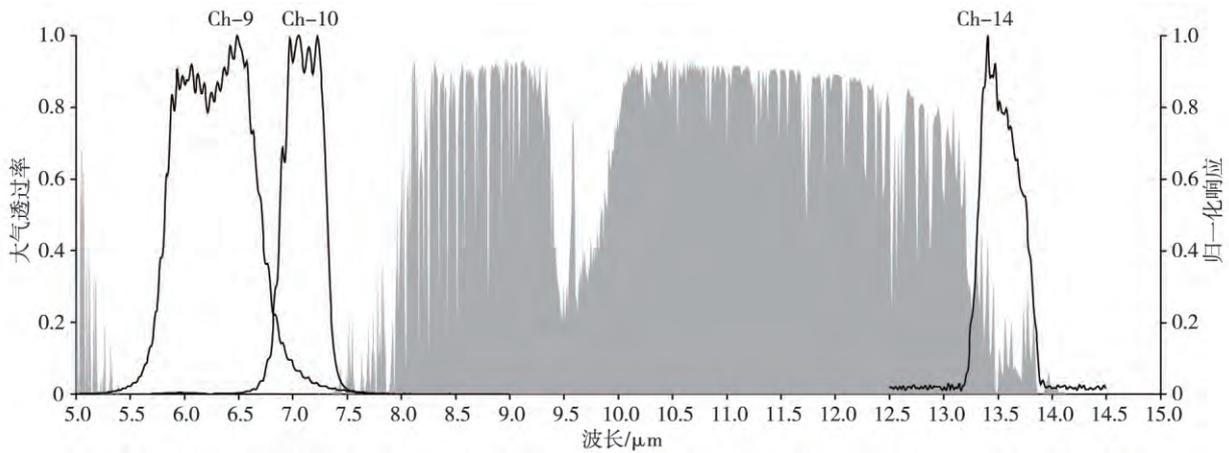


图 9 FY-4A 成像仪红外吸收通道光谱响应  
Fig.9 FY-4A infrared absorption channel spectral response

对比图 10 中的通道 9 和通道 10 图像,可以看到通道 9 图像温度更低,这说明通道 9 观测到的目标主要是高层水汽分布信息;对比通道 10 和通道 14 可以看到,以澳大利亚西侧海洋为例,通道 14 更多观察到了大气中底层的信息。为了支持天气应用,利用美国标准大气廓线,可以计算 FY-2G 水汽吸收通道(中心波长 6.95  $\mu\text{m}$ )和 FY-4A 通道 9 和通道 10 的大气透过率随高度的变化,图 11 给出了

计算结果。可以看出, FY-4A 通道 9 权重函数的峰值在 356 hPa (7.81 km), FY-4A 通道 10 权重函数的峰值在 490 hPa (5.79 km), FY-2G 水汽吸收通道的权重函数的峰值在 364 hPa (7.67 km),说明上述 3 个水汽吸收通道所观测到的都是大气中高层信息,主要观测到的大气信息来自权重函数峰值附近的高度,基于此原理,可以确定云的高度。需要说明的是,权重函数随高度的变化幅度反映了对观测

贡献最大的气层厚度信息,图 11 中红色线条标注 FY-4A 通道 9 和通道 10 的权重函数远比图中绿色的 FY-2G 卫星水汽吸收通道权重函数锐利,由于 FY-4A 的水汽通道比风云二号水汽通道更狭窄(表 2) 因此 FY-4A 水汽通道贡献气层的厚度要比风云二号要更薄一些,也就意味着 FY-4A 观察到的水汽

通道高度信息比风云二号更精细。当大气稳定在某一状态时,水汽通道的透过率由水汽含量多少决定,透过率对气压的微分表征了不同高度处对卫星接收到总辐射量的权重,权重函数及透过率随高度的变化,表示为  $d\tau/d\ln p$ 。

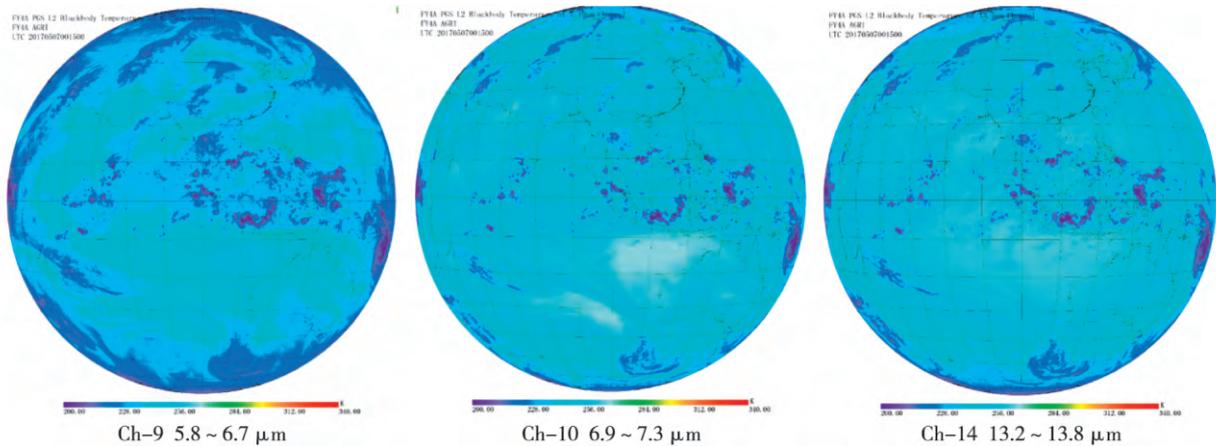


图 10 FY-4A 成像仪吸收通道图像  
Fig.10 FY-4A infrared absorption channel images

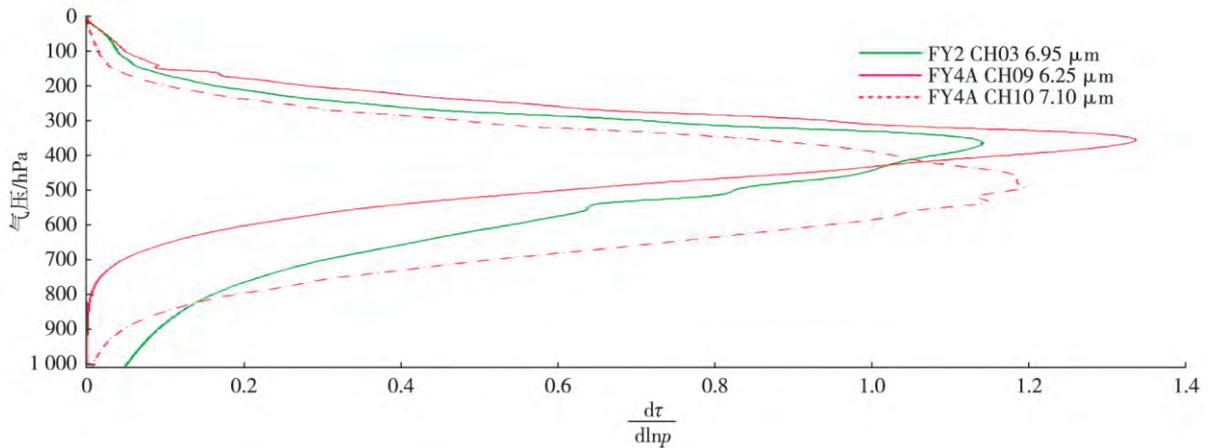


图 11 静止气象卫星水汽吸收通道权重曲线  
Fig.11 Weighting function of FY-4A infrared absorption channel

### 3.4 红外窗区波段

图 12 给出了 FY-4A 成像仪在红外大气窗区波段的 3 个观测通道的光谱响应,并将其与美国标准大气透过率叠加。这 3 个观测通道大气透过率很高,其中通道 12 的大气透过率特别高,而通道 11 和通道 13 的大气吸收也很微弱。图 13 给出了 FY-4A 成像仪红外窗区通道 11、12、13 的图像。

通道 11 的波长范围 8.0~9.0  $\mu\text{m}$ ,用于昼夜云顶微物理状态相态的确定,可获取粒子大小信息,

用于沙尘信息判别。

通道 12 的波长范围 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ ,位于大气窗区,用于观测地球表面和云顶温度。

通道 13 的波长范围 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ ,位于大气窗区边缘,有弱吸收。

风云四号成像仪数据观测的重要的应用是通过定量遥感手段从多光遥感数据中提取云、地表和大气的各种物理参数,表 3 列出了风云四号定量遥感产品所使用的通道列表。

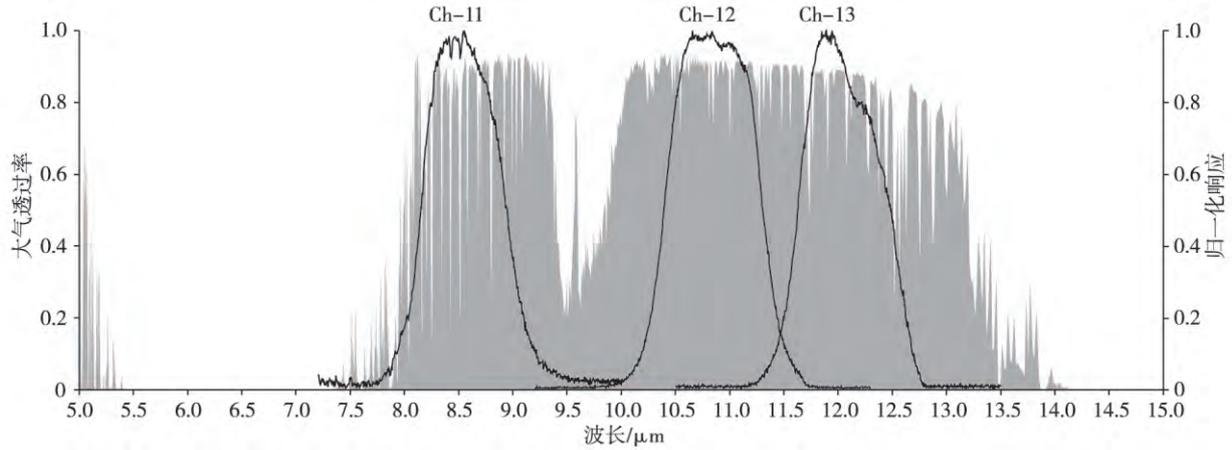


图 12 FY-4A 成像仪红外窗区通道光谱响应  
Fig.12 FY-4A infrared window channel spectral response

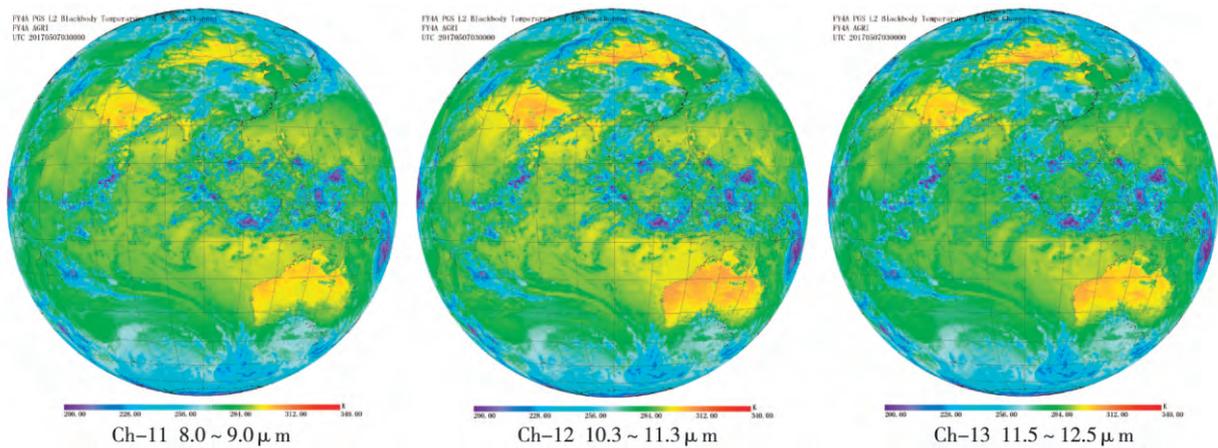


图 13 FY-4A 成像仪红外窗区通道图像  
Fig.13 FY-4A infrared window channel images

表 3 FY-4A 成像仪定量遥感产品使用通道列表

Table 3 Image channels for FY-4A product generation

风云四号定量遥感产品	通道中心波长/ $\mu\text{m}$	风云四号定量遥感产品	通道中心波长/ $\mu\text{m}$
雾、低云检测	0.65、3.72、10.8	地表比辐射率	7.1、8.5、12
地表温度	10.8、12	云检测	0.65、1.61、3.72、8.50、12、13.5
反射短波辐射	0.65、0.83	高层水汽云导风	6.25
射出长波辐射	6.25、7.1、8.5、10.8、13.5	低层水汽云导风	7.1
上行射出长波辐射	8.5、10.8、12、13.5	红外云导风	10.8
下行射出长波辐射	10.8、13.5	云类型和云相态	7.1、8.5、10.8、12
热点检测	0.65、0.83、3.72( high )、10.8、12	云顶高度、温度、气压	10.8、12、13.5
降水	10.8	海洋气溶胶	0.47、0.65、0.83、1.37、1.61、2.21
分层水汽	6.25、7.10、8.5、10.8、12.0、13.5	陆地气溶胶	0.47、0.65、0.83、1.37、1.61、2.21
反射率	0.47、0.65、0.83、1.37、1.61、2.22	沙尘检测	0.47、0.65、0.83、1.37、1.61、2.21、3.72、8.5、10.8、12.0
白天云微物理	0.65、2.22	对流初生	0.65、3.72、6.25、7.1、8.5、10.8、12.0、13.5
夜晚云微物理	7.10、8.50、12	对流层顶折叠检测	6.25
积雪覆盖	0.47、0.65、0.83、1.37、1.61、2.22、3.72、6.25、7.10、8.50、12、13.5	海表温度	3.72、10.8、12
地表太阳入射辐射	0.47、0.65、0.83、1.37、1.61、2.22		

## 4 结论

风云四号静止轨道气象卫星成像仪的观测谱段设置、空间/时间分辨率相比现有风云二号业务气象卫星均有显著提升,其新增的观测通道对监测大气气溶胶、沙尘/火山灰、云相态和火点提供了全新的观测支撑<sup>[16]</sup>。为了充分发挥FY-4A静止轨道气象卫星成像仪的效益,在全面开展定量遥感应用的同时,建议开展多通道的快速合成技术研究,揭示快速的中小尺度天气系统发展过程信息,为强天气预警和短临预报预警服务。

## 参考文献:

- [1] Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, et al. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(8): 1079-1096.
- [2] Puschell J J, Menzel W P, Iwasaki T, et al. Japanese Advanced Meteorological Imager [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5658(1): 75-90.
- [3] Rodriguez A, Stuhlmann R, Tjemkes S, et al. Meteosat Third Generation: mission and system concepts [J]. *Proc SPIE*, 2009, 7453(93): 8.
- [4] Lu F, Zhang X, Xu J. Image navigation for the FY2 geosynchronous meteorological satellite [J]. *J Atmos Ocean Technol* 2008, 25(7): 1149-1165.
- [5] Yang J, Zhang Z, Wei C, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites - FengYun 4 (FY-4) [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2016. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0065.1.
- [6] Lu F, Shou Y. Channel simulation for FY-4 AGRI [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2011: 3265-3268.
- [7] 张晓虎, 陆风, 龚芳丽, 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.
- [8] Minzner R A. The 1976 Standard Atmosphere and its relationship to earlier standards [J]. *Rev Geophys*, 1977, 15(3): 375-384.
- [9] Baldrige A M, Hook S J, Grove C, et al. The ASTER spectral library version 2.0 [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(4): 711-715.
- [10] 中国遥感卫星辐射校正场. 卫星校正场地面和典型地物波谱数据集 [M]. 北京: 气象出版社, 2008: 1-346.
- [11] Singh S M. Simulation of solar zenith angle effect on global vegetation index (GVI) data [J]. *Int J Remote Sens*, 1988, 9(2): 237-248.
- [12] Dozier J, Frew J. Atmospheric corrections to satellite radiometric data over rugged terrain [J]. *Remote Sens Environ*, 1981, 11(81): 191-205.
- [13] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. *Int J Remote Sens*, 1988, 9(8): 1357-1381.
- [14] Miller S D, Schmit T L, Seaman C J, et al. A sight for sore eyes: The return of true color to geostationary satellites [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2016, 97(10): 1803-1816.
- [15] 吴容华. 真彩色合成图大气订正算法 [C]// 风云四号静止气象卫星地面应用系统工程科学算法文档. 北京: 国家卫星气象中心, 2016.
- [16] Hansen M C, Reed B. A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products [J]. *Int J Remote Sens* 2000, 21(6): 1365-1373.