

我国风云极轨气象卫星及应用进展

何锡玉 蔡夕方 朱亚平 张雷
(中国人民解放军91001部队, 北京 100161)

摘要: 我国风云极轨气象卫星数据, 目前已经被应用在天气预报、气候预测、自然灾害、环境监测、科学研究等多个重要领域, 为我国国民经济建设、国防建设、防灾减灾和全球许多国家的经济发展做出了重要贡献。本文介绍了我国风云极轨气象卫星的发展历程, 重点阐述了目前风云极轨气象卫星在卫星数据预处理、定量产品反演、卫星资料同化等方面的应用研究进展, 并展示了第二代风云极轨气象卫星在全球业务观测、大气三维探测、海洋环境监测、数值预报应用等相关典型应用。在国家创新战略发展框架下, 根据“国家级气象现代化总体方案”确定的2020年气象卫星及应用发展目标, 第二代极轨气象卫星风云三号03批卫星系统工程必将进一步发挥重大支撑作用。

关键词: 风云极轨气象卫星, 大气探测, 海洋监测, 卫星资料同化, 典型应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.006

The Development of FY Polar Orbiting Meteorological Satellite and Its Application

He Xiyu, Cai Xifang, Zhu Yaping, Zhang Lei
(Unit No. 91001 of PLA, Beijing 100161)

Abstract: The FY polar orbiting meteorological satellite data has been used in many important fields such as weather forecast, climate prediction, the monitor of environment and natural disaster, and scientific research. It has made great contribution to the national economy, defense, disaster prevention and mitigation, and economic development of many countries in the world. This paper focuses on 1) the development history of the FY polar orbiting meteorological satellite, 2) the application and research progress of the FY polar orbiting meteorological satellite in data pretreatment, quantitative product retrieval, and data assimilation, 3) the typical application of the second generation FY polar orbiting meteorological satellite in global observation, atmospheric 3D detection, marine environment monitoring, numerical forecast application, and so on. According to the 2020 meteorological satellite and application development target set by the national meteorological modernization master plan, the FY-3(03) satellites system will further play a significant supporting role under the framework of national innovation strategic development.

Keywords: FY polar orbiting meteorological satellite, atmospheric sounding, marine monitoring, satellite data assimilation, typical application

0 引言

卫星遥感具有覆盖范围广、观测连续性强、不受自然条件和地域限制的优势, 是监测和预防气象灾害及其他自然灾害的有效手段。我国从20世纪70年代开始实施自己的气象卫星计划, 经过40多年的工作, 已经成功发射了风云一号(FY-1)、风云二号(FY-2)、风云三号(FY-3)、风云四号(FY-4)系列气象卫星共16颗, 其中极地轨道系列气象卫星(FY-1、FY-3)共8颗, 完成了极轨气象卫星从试验应用型向业务服务型转变, 从第一代极轨气象卫星到第二代极轨气象卫星的转变, 从单一探测到综合探测的转变, 从定性应

用到定量应用的转变, 实现了业务化、系列化和定量化的发展目标^[1]。

1 风云极轨气象卫星发展历程

风云一号卫星分为两个批次, 各两颗星。01批的FY-1A星于1988年7月9日发射, FY-1B星于1990年9月3日发射。02批卫星在01批星的基础上, 改进了姿态控制系统的可靠性和扫描辐射计的性能, 将原先5个通道(0.48~0.63 μm 、0.53~0.58 μm 、0.58~0.68 μm 、0.725~1.10 μm 、10.5~12.5 μm)增加到10个通道(0.43~0.48 μm 、0.48~0.53 μm 、0.53~0.58 μm 、0.58~0.68 μm 、0.84~0.89 μm 、0.900~0.965 μm 、1.58~1.64 μm 、3.55~3.93 μm 、10.3~11.3 μm 、11.5~12.5 μm); 甚高分辨率图像传输数传码速率相应提高一倍, 由0.6654 Mbps提高到1.3308 Mbps; 星上装置了固态存储器, 实现了延时图像传输的数字化。这

收稿日期: 2019年7月4日; 修回日期: 2019年8月28日
第一作者: 何锡玉(1980—), Email: hexynew@163.com
资助信息: 国家重点研发计划项目(2017YFC1404005)

一系列的改进使02批星性能得到大幅度的提高,寿命都大大超过2年的设计寿命。02批的FY-1C星于1999年5月10日发射, FY-1D星于2002年5月15日发射。

风云三号卫星是我国第二代极轨气象卫星,它是在风云一号卫星技术基础上的发展和提高,在功能和技术上向前跨进了一大步,具有质的变化。风云三号01星(FY-3A)和风云三号02星(FY-3B)上搭载了众多先进的探测仪器,包括可见光红外扫描辐射计、红外分光计、微波辐射计、中分辨率成像光谱仪、微波成像仪、紫外臭氧探测器、地球辐射收支探测器、空间环境监测器等。风云三号03星(FY-3C)充分继承了FY-A/B星的成熟技术,核心遥感仪器技术状态在原有基础上进一步提升性能。星上搭载了12台套遥感仪器,包括: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、微波成像仪、中分辨率光谱成像仪、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、太阳辐射测量仪、空间环境监测仪器包和全球导航卫星掩星探测仪。而风云三号04星(FY-3D)装载了10台套先进的遥感仪器,除了微波温度计、微波湿度计、微波成像仪、空间环境监测仪器包和全球导航卫星掩星探测仪等5台继承性仪器之外,红外高光谱大气探测仪、近红外高光谱温室气体监测仪、广角极光成像仪、电离层光度计为全新研制、首次上星搭载,核心仪器中分辨率光谱成像仪进行了大幅升级改进,性能提升显著。这些先进的探测仪器具体为解决三维大气探测,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气象卫星的应用目的包括四个方面:①为中期数值天气预报提供全球均匀分辨率的气象参数;②研究全球变化包括气候变化规律,为气候预测提供各种气象及地球物理参数;③监测大范围自然灾害和地表生态环境;④为各种专业活动(航空、航海等)提供全球任一地区的气象信息,为军事气象保障服务(<http://www.nsmc.org.cn/NSMC/Channels/100184.html>)。风云三号01批为试验星,包括两颗卫星,即风云三号01星(FY-3A)和风云三号02星(FY-3B),已分别于2008年5月27日和2010年11月5日成功发射。风云三号02批卫星是我国第二代业务极轨气象卫星,风云三号03星(FY-3C)是02批卫星的首发星,于2013年9月23日成功发射。风云三号04星(FY-3D)是我国第二代极轨气象卫星第二颗业务星,于2017年11月15日成功发射。

2 应用研究进展

2.1 卫星数据预处理

风云极轨气象卫星为三轴稳定卫星, FY-1卫星使用的地平穿越式红外地平仪,姿态测量精度较低,无法直接用于遥感数据地理定位计算过程中的姿态校正,主要通过地标点匹配计算方法来估计卫星的姿态误差,然后采用参数化方法进行遥感图像地理定位计算^[2]。第二代极轨气象卫星FY-3星上搭载了高动态GPS接收机,实时提供星载GPS测量的卫星三维位置信息,并由星载陀螺仪和星敏感器自动测量卫星姿态数据^[3]。FY-3卫星地理定位算法进一步提高了坐标系转换精度,同时采用卫星的精密定轨和高精度轨道预报相结合的方法,提高了GPS测量数据的可靠性和轨道计算的可靠性及连续性^[4]。

近年来,国家气象卫星中心先后研发了交叉定标、地球稳定目标定标、月亮定标、深对流云定标等多种定标技术,建立了一套将发射前实验室定标、多场地定标、月亮定标、深对流云定标和交叉定标融为一体的综合定标系统。该系统利用不同定标方法的优势,经综合分析得到反射太阳波段在轨响应变化特征,有效解决了场地定标存在的问题。目前风云气象卫星太阳反射波段平均定标偏差在5%左右^[5]。与太阳反射通道相比,由于大气红外探测仪(AIRS)和干涉式红外大气探测仪(IASI)等红外高光谱遥感的出现,红外通道的交叉定标更为成熟。FY-3卫星红外与微波通道星上定标技术相对成熟,目前红外通道定标偏差平均在0.5 K左右,微波通道平均定标偏差在1 K以内^[6]。

为了满足数值预报应用需求,明确提出到2020年风云卫星红外波段在轨辐射定标精度达到0.4 K,微波在轨辐射定标精度达到0.8 K,可见近红外波段在轨辐射定标精度在5%以内。

2.2 卫星载荷探测及产品反演

风云极轨气象卫星可提供数十种定量产品,产品分为大气、陆地、海洋、空间天气等几大类。以FY-3A/B星载仪器为例,仪器光谱范围十分宽广,实现了对地球大气的全天候的多用途综合探测及产品反演。其中可见光红外扫描辐射计(VIRR)可探测反演云、植被、雪、冰、陆/海表温度、气溶胶、火点等;红外分光计(IRAS)突破了红外窄带滤光片(3 cm^{-1})的研制技术,实现了较高光谱分辨率红外大气垂直温湿廓线的探测反演;IRAS和微波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)组成的大气探测仪器包,利于红外和微波探测优势互补,协同反演,提高大气参数温湿廓线、降水等的反演精

度；中分辨率光谱成像仪（MERSI），实现了宽视场（2000 km）和高分辨率（250 m）的全球云和地表特征监测，也是世界上首次获得了全球地表和云特征的自然景观影像图谱；微波成像仪（MWRI）采用双极化探测技术，可进行全天候动态跟踪监测台风等强对流天气，监测地面干湿程度，反演洋面风速等；紫外臭氧总量探测仪（TOU）和紫外臭氧垂直探测仪（SBUS），不仅能获取大气柱臭氧总量，而且可以探测臭氧在不同大气压高度层的分布；太阳辐射监测仪（SIM）和地球辐射监测仪（ERM）为了解和研究太阳辐射及地气系统辐射收支提供了宝贵的资料；空间环境监测仪（SEM）可探测高能粒子、星体内辐射、卫星表面电位差和粒子事件等，为其他飞行器和中国神州飞船安全飞行提供服务^[7]。

从FY-3C星开始，风云极轨气象卫星产品生成系统有较大改进^[1]，主要表现在：进一步改进了定量产品反演算法；完善了数据存储分发格式；修正了FY-3A/B星产品系统中存在的一些错误；建立了产品算法及质量检验文档；新增了大气掩星探测、极地云导风等产品，产品序列更加完整。FY-3C星定量产品精度整体优于FY-3A/B星，同时，首次提供5 km分辨率全球整幅定量遥感产品，用于开展气候及全球变化研究。

2.3 卫星资料同化

风云极轨气象卫星为环境监测、天气预报、资料同化等提供全球观测资料。第二代极轨气象卫星发射成功后，其上搭载的大气红外探测器、微波温度探测器、微波湿度探测器、微波辐射成像仪、GNSS掩星探测仪等载荷为数值天气预报提供了大量的观测数据，如图1所示^[8]。尤其是FY-3的微波观测资料的利用一直是研究的一个热点，陆其峰在ECMWF的工作中，定量评价了FY-3A卫星观测资料的质量及应用前景，为FY-3A卫星辐射资料的应用打下了基础^[9-11]。Chen等在陆其峰工作基础上，在ECMWF同化系统中利

用FY-3A/B的微波湿度计资料（MWS）进行的试验表明，MWS观测资料是对ECMWF微波湿度资料的很好补充，且对数值预报结果产生了积极作用，因此ECMWF将FY-3A/B的MWS观测资料加入其同化系统中^[12]。Heather Lawrence等对FY-3C的MWS II观测资料进行了质量评估，并将其应用到ECMWF同化系统中，结果表明对预报系统预报准确度有改进^[13]。我国自主研发的全球数值天气预报系统GRAPES已将FY-3C的微波湿度计II型（MWS II）、FY-3B/C的微波成像仪（MWRI）、FY-3C的全球导航卫星掩星探测仪（GNOS）等观测资料进行了同化应用；军用数值天气预报系统也已将大量的FY-3卫星观测资料应用到业务化同化系统中，有效提升了数值天气预报军事保障能力。

3 典型应用

风云极轨气象卫星装载多种探测仪器，可提供丰富的全球影像产品、大气产品、陆表产品、海洋产品、辐射产品、空间监测产品等，在大气、海洋空间环境监测、数值预报、军事保障应用等方面发挥了重要作用。

3.1 全球业务观测

FY-3卫星具备对大气、海洋和地表状态进行全球、全天候条件下的多光谱和三维精确观测的能力，能为提高中国及其他亚洲国家，乃至全世界的天气预报的质量和自然灾害与环境的监测水平做出贡献。图2为FY-3C可见光红外扫描辐射计2015年5月16日全球影像图。



图1 FY-3A/B/C/D用于数值天气预报的探测载荷^[8]
Fig.1 The FY-3A/B/C/D instrument suits for NWP

① 来源：国家卫星气象中心数据服务<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>。

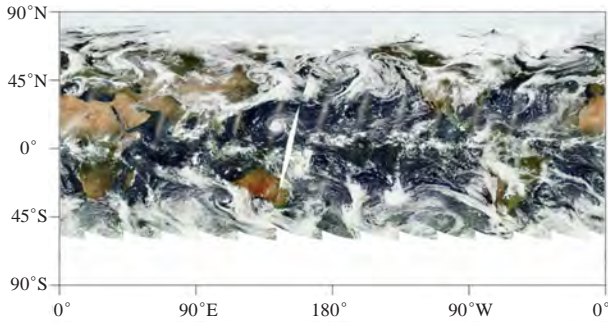


图2 2015年5月16日FY-3C/VIRR全球影像图

Fig.2 Global image of the FY-3C/VIRR on 16 May 2015

3.2 大气三维探测

FY-3卫星上携带有先进的微波探测仪器和红外垂直探测仪,不仅可以了解云和大气表面特性,而且可以了解大气温度湿度的垂直结构分布,实现了我国气象卫星从二维遥感成像到三维综合大气探测,在极轨气象卫星领域更进一步缩小与美国、欧洲等发达国家和地区的差距,增强我国参与国际合作和竞争的能力。

1) 台风三维监测。卫星遥感以其面积大、全天候和全天时的观测优势,是监测台风的有效手段。微波湿度计是FY-3卫星上的重要载荷,FY-3C星微波湿度计II型是我国FY-A/B星微波湿度计的升级换代产品,在150 GHz、183 GHz的基础上增加了89 GHz、118 GHz探测频率,探测通道也由5个增加到15个,显著提升了微波湿度计的探测能力,实现了多通道的细分探测,并且能够深入云层探测台风内部亮温分布,通过其内部亮温分布对台风内部结构进行诊断,对台风路径的预报提供技术手段。图3为FY-3C微波湿度计探测1323号台风菲特(Fitow)内部结构图^[14]。

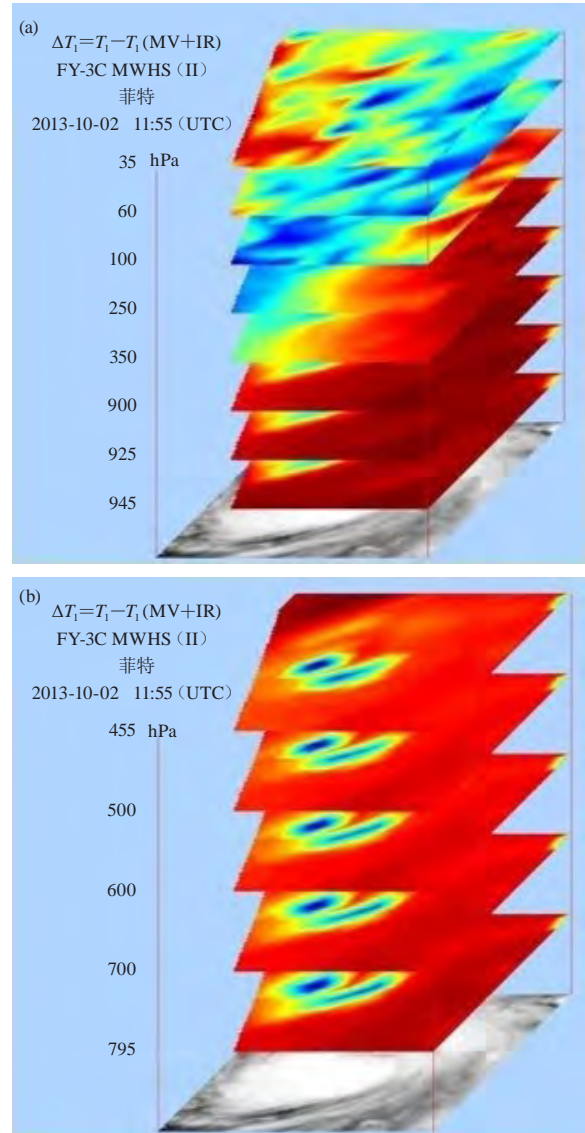
2) 全球湿温廓线反演。大气温度和湿度廓线是数值天气预报和实时天气预报的重要输入参数,利用星载微波探测仪被动探测全球范围的大气温度和湿度分布及其变化,可弥补偏远地区常规探空气象资料的不足,是获取全球大气温湿场的最佳选择之一。

FY-3卫星首次搭载的微波遥感器件有微波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)分别用于探测大气温度和湿度廓线。图4为FY-3C微波湿温度计和AMSU-B观测资料反演的大气温湿廓线,其结果较为一致^[15]。

3.3 海洋环境监测

风云三号不仅可提供丰富的全球大气产品还可以提供丰富的海洋环境产品,包括海面温度、海冰监测、海面风速、海洋水色等。

1) 海面温度。海面温度在海洋动力研究、海洋渔业等方面有重要的作用,利用卫星资料反演海面

图3 2013年10月2日FY-3C星微波湿度计探测1323号台风菲特内部亮温分布^[14]

(a) 118 GHz; (b) 183 GHz

Fig.3 Internal brightness temperature distribution of Typhoon Fitow detected by the FY-3C/MWHS on 2 October 2013

(a) 118 GHz; (b) 183 GHz

温度是获得大范围海面温度重要的途径。图5为FY-3C/VIRR反演的全球月平均白天SST分布。

(2) 海冰监测。海冰对海洋水文要素的垂直分布、海水运动、海洋热状况及大洋底层水的形成有重要影响,对航运、建港也构成一定威胁。我国渤海和黄海北部海域,每年冬季皆有不同程度的结冰现象。利用风云三号卫星资料,可对渤海的海冰灾害进行监测。图6为2010年1月13日FY-3A/MERSI渤海海冰监测图(图片来源:中国遥感信息服务网<http://rsapp.nsmc.org.cn/uus/index.jsp>)。

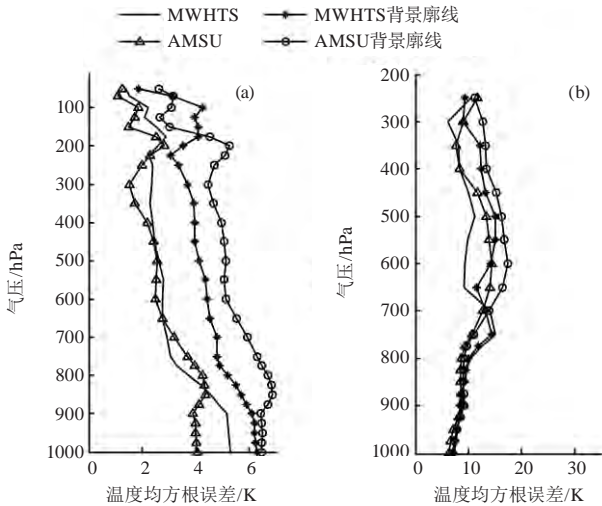


图4 FY-3C/MWHTS与AMSU-B观测资料反演大气温湿廓线对比^[15]

(a) 温度均方差根误差; (b) 湿度均方差根误差

Fig.4 Comparison of temperature and humidity profiles retrieved from

the FY-3C/MWHTS and AMSU-B observations:

Root mean square errors for temperature (a) and humidity (b)

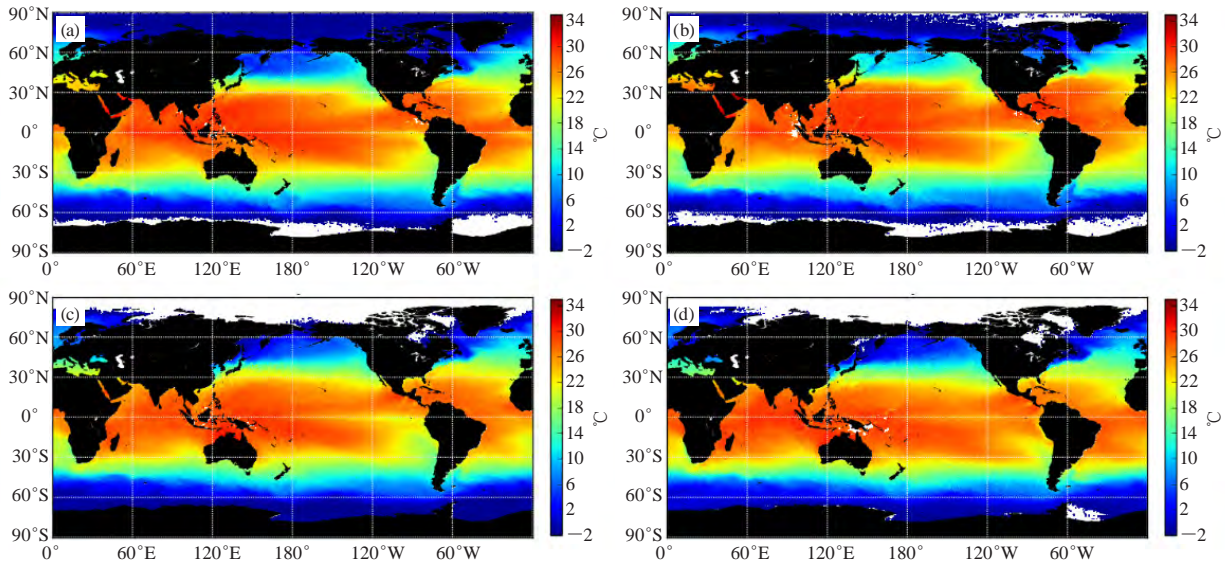


图5 2017年7月(a)、2017年9月(b)、2017年12月(c)和2018年3月(d)的全球月平均白天SST分布图(FY-3C/VIRR)

Fig.5 Global monthly daytime SST of FY-3C/VIRR in July 2017(a),September 2017 (b),December 2017(c),and March 2018(d)

线表示同化了常规观测和MWHTS II观测资料的台风路径预报结果偏差。可以得出,在台风路径预报偏差上,只同化常规观测资料的试验结果偏差最大,而在常规观测资料上加上MWHTS II观测资料或MWHTS II观测资料都对台风路径预报产生了正影响。

3.5 军事保障应用

随着军队作战使命任务的拓展和战略转型建设逐步深化,大量高新技术武器装备系统及作战平台的使

3.4 数值预报应用

数值预报是现代气象预报预测业务的基础。目前,国际上影响和制约数值预报准确率和预报时效的关键是大气运动的初始场和大气物理及化学过程的处理。根据国家经济社会发展需求,中国气象局在“国家级气象现代化总体方案”中明确提出到2020年以中国风云卫星资料同化应用为核心,研发多源卫星观测资料数据同化系统,实现卫星遥感探测资料占所同化观测资料总量的80%以上。

风云极轨气象卫星能够提供全球的温、湿、云辐射等气象参数,为中期数值天气预报提供全球均匀分辨率的气象参数;能够全天候、全天时获取全球大气亮温分布图像,进而反演全球降雨及温度和湿度的垂直分布,为中长期数值天气预报以及全球环境和气候变化研究提供服务^[16-17]。图7为FY-3C星的MWHTS II、MWTS II观测资料同化在台风海鸥路径预报偏差中的试验,绿色实线代表只同化了常规观测资料的台风路径预报结果偏差,红色实线表示同化了常规资料和MWHTS II观测资料的台风路径预报结果偏差,蓝色实

用尤其是海上作战平台的使用对信息化建设的需求越来越迫切,特别是航母编队的建设及发展,大气海洋环境保障需求几乎覆盖全球,全球化军事行动、非战争军事行动、新型武器系统和作战平台对军事大气海洋环境保障能力提出了更高的要求。

现阶段,针对军事大气海洋环境保障需求,充分挖掘FY-3卫星数据产品在军事大气海洋环境保障中的应用,研究制定基于FY-3卫星数据产品的军事大气海

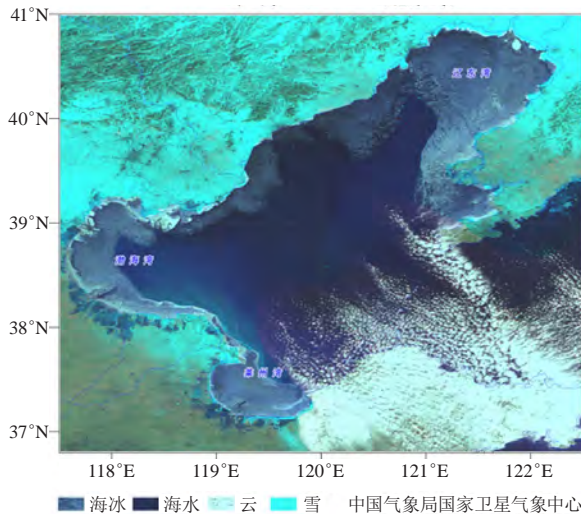


图6 2010年1月13日10:50 (北京时间) FY-3A/MERSI渤海海冰监测图

Fig.6 Bohai Sea ice monitoring of FY-3A/MERSI at 10:50 BT on January 13, 2010.

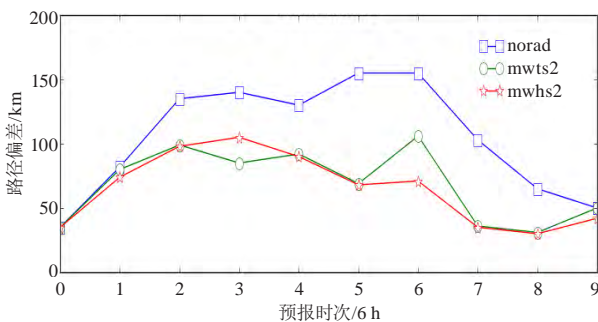


图7 台风海鸥路径预报偏差试验 (FY-3C/MWHTS)

Fig.7 The path deviation forecast test of Typhoon Kalmaegi

洋保障应用系统, 从而提升军事大气海洋环境保障综合能力, 主要体现在以下几方面:

1) 利用FY-3卫星获取全球可见光和红外云图, 针对军事训练作战任务的特点进行反演监测, 重点监测海上和目标区低云大雾的发生及演变情况, 为水面舰艇航行和航空飞行安全、精确制导武器运用保障提供实时云雾环境信息。

2) 利用FY-3卫星获取全球海面风场和海面温度信息, 为海上军事行动和舰(艇)载武器装备运用提供实时海况信息保障; 获取低轨道空间粒子辐射能谱和辐射剂量, 为航天器故障分析和运行安全保障提供实时粒子辐射监测信息。

3) 利用FY-3卫星资料反演生成大气海洋环境参数定量产品, 为军用大气海洋数值预报提供初始场。

4 展望

在国家创新战略发展框架下, 风云极轨气象卫星系统工程要在国家建设中发挥科技支撑作用, 支撑

国家提高应对自然灾害与突发事件的能力, 提升国家防灾减灾能力, 保障国家安全; 支撑国家战略新兴产业发展, 满足日益扩展的社会对风云卫星遥感信息的服务需求; 继续拓展完善风云三号全球观测能力, 参与国际对地观测活动, 推进国际化合作, 保障国家利益。

第二代极轨气象卫星风云三号03批卫星将瞄准气象卫星国际发展先进水平, 发展以数值天气预报为主要应用目标的晨昏星; 以地球表面成像观测为主要应用目标的上午星; 以大气定量探测和气候变化监测为主要应用目标的下午星; 以灾害性天气系统强降水监测为主要应用目标的降水星, 进一步完善和丰富我国现有的现代气象业务观测体系。建成世界一流的风云极轨气象卫星观测体系, 实现我国第二代极轨气象卫星的组网业务化观测, 带动我国气象卫星应用进入成熟发展阶段, 实现气象现代化所确定的2020年气象卫星及应用发展目标。

参考文献

- [1] 唐世浩, 邱红, 马刚. 风云气象卫星主要技术进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 842-849.
- [2] 杨忠东, 关敏. 风云卫星遥感数据高精度地理定位软件系统开发研究. 遥感学报, 2008, 12(2): 312-321.
- [3] 关敏, 杨忠东. 星载GPS数据及高精度轨道模型在极轨卫星轨道计算中的应用. 应用气象学报, 2007, 18(6): 748-753.
- [4] 关敏, 郭强. 光学像消旋系统在FY-3 MERSI图像定位中的应用. 应用气象学报, 2008, 19(4): 420-427.
- [5] 胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 风云三号A星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标. 气象科技进展, 2013, (4): 71-83.
- [6] 徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. FY-3A/MERSI热红外通道在轨辐射定标精度评估. 光谱学与光谱分析, 2014, (12): 3429-3434.
- [7] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [8] Lu Q, Wu C, Qi C, et al. Brief introduction hyper spectral infrared sounder from FY-4A and FY-3D. <https://www.ecmwf.int/node/17228>, 2017.
- [9] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. An Initial Evaluation of FY-3A Satellite Data. ECMWF Technical Memoranda No.631, 2010.
- [10] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Characterizing the FY-3A Microwave Temperature Sounder Using the ECMWF Model. ECMWF Technical Memoranda No.641, 2011.
- [11] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Improved Assimilation of Data from China's FY-3A Microwave Temperature Sounder. ECMWF Technical Memoranda No.642, 2011.
- [12] Chen K, English S, Bormann N, et al. Assessment of FY-3A and FY-3B MWHS observations. ECMWF Technical Memoranda No.734, 2014.
- [13] Lawrence H, Carminati F, Bell W, et al. An Evaluation of FY-3C MWRI and Assessment of the long-term quality of FY-3C MWHS-2 at ECMWF and the Met Office. ECMWF Technical Memoranda No.798, 2017.
- [14] 张瑜, 张升伟, 王振占, 等. FY-3卫星大气湿度微波探测技术发展. 上海航天, 2017, 34(4): 52-61.
- [15] 贺秋瑞, 王振占, 何杰颖. FY-3C/MWHTS资料反演陆地晴空大气温湿廓线. 遥感学报, 2017, 21(1): 27-39.
- [16] 杨引明, 杜明斌, 张洁. FY-3A微波资料在“莫拉克”台风预报中的同化试验. 热带气象学报, 2012, 28(1): 23-30.
- [17] 董佩明, 黄江平, 刘桂青, 等. FY-3A微波探测资料的直接同化应用及云雨条件下的亮温模拟. 热带气象学报, 2014, 30(2): 302-310.