

风云气象卫星天气应用回顾和展望

王新, 唐世浩, 魏彩英*

国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 近50年来,我国风云气象卫星从无到有、从弱到强,迄今为止已成功发射19颗风云系列气象卫星,现有8颗在轨运行,形成极轨、静止2个系列化、业务化的综合观测网。伴随着卫星所搭载仪器载荷的升级和观测能力的提升,风云气象卫星在天气监测方法和技术也实现了稳步发展。回顾了风云气象卫星和卫星气象学的发展,综述了气象卫星在天气应用方面的发展历程,特别是更新换代的变化在天气应用中的进展。围绕未来需求和风云卫星未来技术发展方向,展望了卫星天气应用的前景和发展趋势。

关键词 风云气象卫星; 台风; 暴雨强对流; 闪电观测; 垂直廓线

风云气象卫星历经半个世纪的发展,取得了举世瞩目的成就。气象卫星资料实现了全球共享,在天气预报、气候变化、灾害监测等应用领域得到广泛使用,特别是在对台风和暴雨强对流灾害性天气监测和预警方面的成效,极大地促进了气象卫星和卫星气象学的发展。卫星天气应用能力的提升与卫星技术发展密不可分,本文以气象卫星发展为主线,回顾气象卫星及其应用的发展历史,分阶段阐述卫星资料在天气中的应用,分析未来天气预报对气象卫星观测的新需求。

1 第一阶段: 卫星天气监测方法探索和初步建立(1970—2000年)

1969年我国开始接收美国“艾萨”卫星的APT

气象卫星云图,1977年日本第一颗气象卫星发射,我国开始利用国外卫星资料开展天气监测方法探索和研究,基本掌握了不同季节影响我国不同地区的大尺度天气系统的卫星云图特征^[1-2],如早期静止气象卫星观测到的自我国东北地区至东南沿海影响范围较广的锋面气旋云系(图1),初步建立基于卫星的台风定位定强估计方法^[3],为我国风云卫星的成功和发射后应用奠定了坚实基础。

1988年9月,中国第一颗极轨气象卫星风云一号A星(FY-1A)成功发射,揭开了中国风云卫星发展的序幕,基于卫星遥感的天气监测技术和应用有了很大的发展^[4],如利用FY-1A卫星形成的中国及周边地区的多轨道拼图,其中在东海至日本海受到台风云系影响(图2)。对于影响我国的主要天气系统包括台风、梅雨锋、中尺度云系发展特征、青藏

收稿日期:2020-12-01;修回日期:2021-04-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1506500,2017YFB0504100)

作者简介:王新,正研级高级工程师,研究方向为卫星气象学,电子信箱:xinwang@cma.gov.cn;魏彩英(通信作者),正研级高级工程师,研究方向为无线电技术与信息系统,电子信箱:weicy@cma.gov.cn

引用格式:王新,唐世浩,魏彩英. 风云气象卫星天气应用回顾和展望[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 23-30; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.15.002

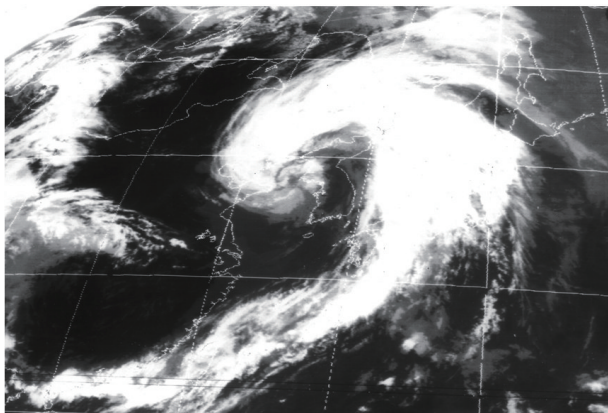


图1 静止气象卫星监测温带气旋云系
(1993年6月3日)

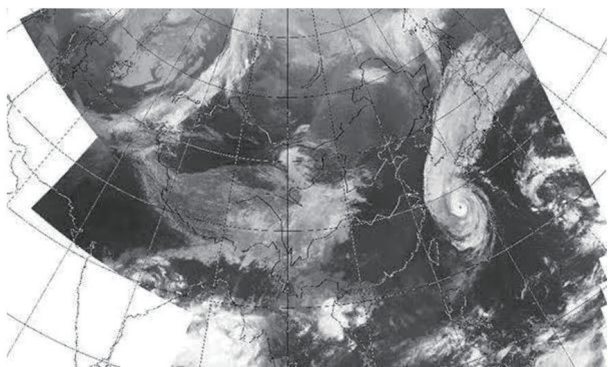


图2 风云一号极轨气象卫星的中国及
周边区域多轨道拼图

高原对流活动等方面取得了重要研究成果。

20世纪80至90年代,卫星云图在暴雨、中尺度对流云团方面的研究能力增强,从暴雨云团结构特征和演变,到中尺度对流复合体的定量监测方法等方面的研究均有很大提升^[5-6]。1997年我国静止气象卫星发射之前,缺乏有关深对流云的中尺度演变及它们所处的局地环境的日常气象信息,气象学家不得不从大尺度观测来推断中尺度天气现象。静止卫星是能够对从天气尺度到积云尺度的各种云演变作同步观测的工具^[7],在连续的卫星云图中观测到了对短时预报很重要的中尺度特征,以及发生发展过程演变,静止卫星的频次连续观测,使其可以通过追踪云来获得大气风场信息^[8],这些更详细的特征探测为中尺度过程的研究和强对流天气的预警提供了新思路^[9],同时,也为西太平洋热带地区的台风及热带天气系统的研究和业务工作提供

了更连续的观测,由分析单张云图到云图动画,弥补了台风生成的前期扰动和发展过程中云型演变特征等补充事实^[10]。

2 第二阶段:卫星天气定量监测方法和内容逐渐拓展(2000—2010年)

2000年以后,随着风云气象卫星队伍的不断发展壮大,极大地满足了天气监测全天候、连续观测的迫切需求。多种卫星反演产品的精度稳定提升,应用于天气分析中的产品越来越多,对天气系统中不同特性的刻画能力不断增强。其中,风云二号(FY-2)静止卫星由3个批次组成,FY-2(01)批包括FY-2A和FY-2B 2颗试验卫星,其可见光-红外成像仪仅有3个通道,空间分辨率偏低,对中小尺度云团成像不清,即便如此,FY-2B卫星在2003和2004年汛期,在日本GMS5卫星停止工作的情况下,为我国广大台站和国际用户提供了有效的卫星云图^[9];FY-2(02)批由FY-2C、FY-2D和FY-2E 3颗业务卫星组成,分别于2004、2006和2008年成功发射,成像仪通道增加到5个通道,实现了我国静止气象卫星“双星观测、互为备份”^[11],在主汛期可以每15 min获取一副云图,增加连续性云图,实现了我国及周边区域天气变化的动态监测,如FY-2C监测到的2009年西北太平洋双台风“莫拉克”和“天鹅”(图3),大大提高了对中小尺度天气系统的监视能力,也有利于天气预报员和公众识别天气系统^[6]。

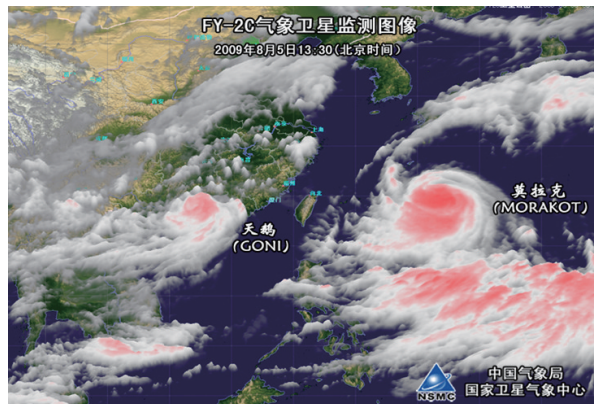
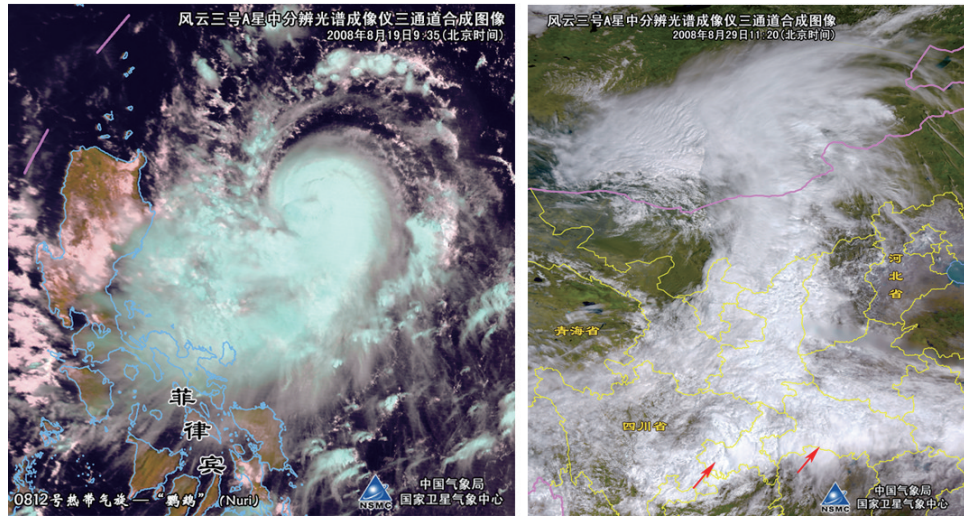


图3 FY-2C监测到的2009年西北太平洋
双台风“莫拉克”和“天鹅”

在这个阶段后期,风云极轨气象卫星实现了升级换代,从风云一号(FY-1)发展到了第二代风云三号(FY-3),第二代第一颗极轨气象卫星FY-3A于2008年发射升空,利用FY-3每日一幅全球无缝隙覆盖的250 m分辨率真彩色通道RGB合成图像^[11],如FY-3卫星观测到的台风和一次锋面气旋天气过程(图4),实现了对赤道辐合带ITCZ、热带气旋、副热带高压、海上细胞云等大尺度的天气现象进行业务监测。同时,空间分辨率的提高和微波大气探测通道的观测信息增加提升了对台风定位

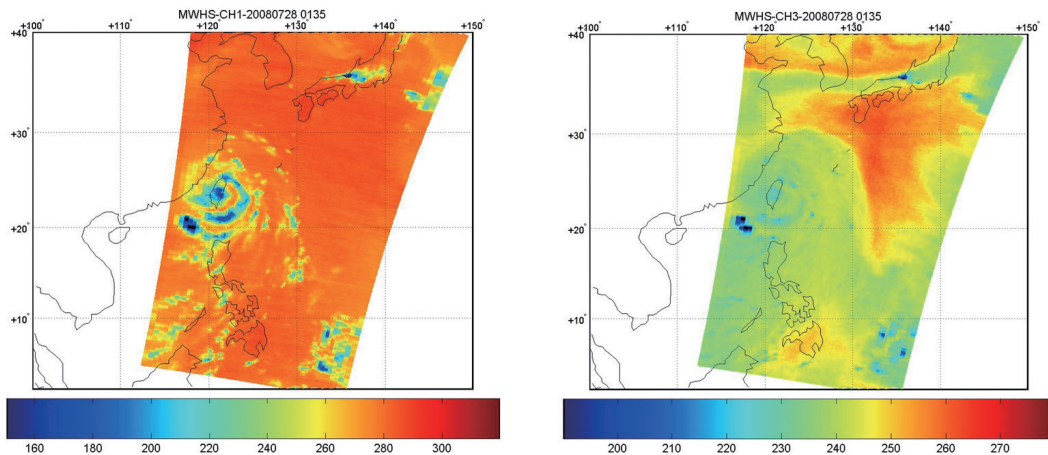
定强精细化判识能力。如利用不同微波通道观测到台风的不同的特征参数(图5),越来越多的研究聚焦在基于卫星资料定量估算热带气旋强度结构等关键参数^[12]。FY-3A和FY-3B形成了上下午组网观测能力,实现了对地球系统的全球、全天候、多光谱综合观测^[13]。高时空分辨率的卫星观测能够更精细地捕捉到台风云系中小尺度对流组织化活动,以及其中中尺度云团的初生和分布所代表的TC结构的对称程度^[14]。



(a) 2008年“鹦鹉”台风

(b) 锋面气旋云系

图4 FY-3卫星天气监测图像



(a) 台风螺旋云系

(b) 400hPa水汽分布

图5 FY-3卫星微波探测仪器不同通道的台风观测图像

此外,基于气象卫星观测信息研究强对流初生、快速识别、微物理特性等方面的发生发展的计算方法、定量应用技术也是除数值预报同化应用以外的一个重要发展方向。在气象卫星遥感数据从图像解译向定量化、智能化处理方面发展的过程中,云图解译的方法理论方面得以发展,先后有《水汽图像》《卫星观测的热带云和云系》《卫星气象学》等著作发表,为云图解译奠定了天气分析向定量化发展的理论体系基础^[15]。

3 第三阶段:卫星天气监测向机理及预测的延伸发展(2010—2020)

在过去的10年里,风云气象卫星在“极轨”和“静止”2个系列卫星都取得了更加显著和快速的发展,实现了更新换代,搭载仪器能力也有了全面升级,形成了全球和区域观测优势互补的卫星星座布局(图6)。

FY-2(03)批包括FY-2F、FY-2G和FY-2H 3颗卫星,保持双星备份,实现了“两个特别”。第一个“特别”是自2012年起,FY-2F启用了区域加密观测模式,实现了对暴雨和台风对我国产生最强影响的时段的观测频次提升到6 min/次,基于观测频次的提升,预报员可以提前10 min对台风进行定位以及定强分析^[14-15],促进提升了中国气象局台风定位水平达到世界先进水平。如2017年影响力超

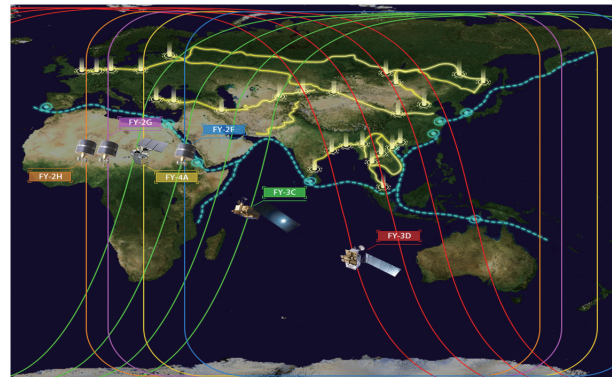


图6 FY-2、FY-4和FY-3卫星观测范围及“一带一路”示意

群的“天鸽”台风(图7),间隔6 min的云图非常清晰地记录了登陆前后的1 h,“天鸽”台风眼区云系的发展演变,这样的精细变化在FY-2F实现区域快速扫描之前是无法获知的。第二个“特别”是风云二号系列卫星的最后一颗卫星FY-2H,2018年中国气象局、国防科工局和亚太空间合作组织签署风云气象卫星应用合作意向书,确定将FY-2H定位在79°E,观测覆盖范围最西端可以达到4°E附近,即:FY-2H作为“一带一路”气象卫星为地区和国家提供服务^[16]。包括亚洲50个国家、非洲41个国家、欧洲39个国家、大洋洲9个国家,“一带一路”沿线的64个国家。近3年已经基于风云卫星应急机制(ESM)为“一带一路”国家提供服务专报50余期,例如2019年莫桑比克“伊代”台风(图8)、2020年1月伊朗暴雨洪水、5月孟加拉湾“安攀”台风等。

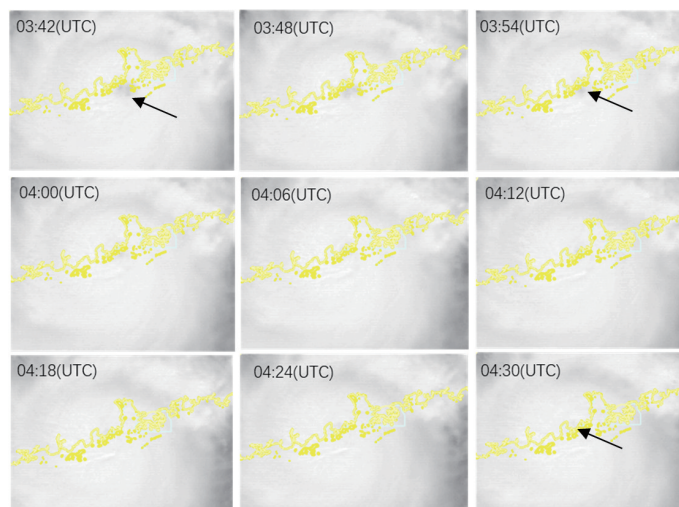


图7 FY-2F卫星间隔6 min/次的区域加密观测(2017年“天鸽”台风登陆过程)

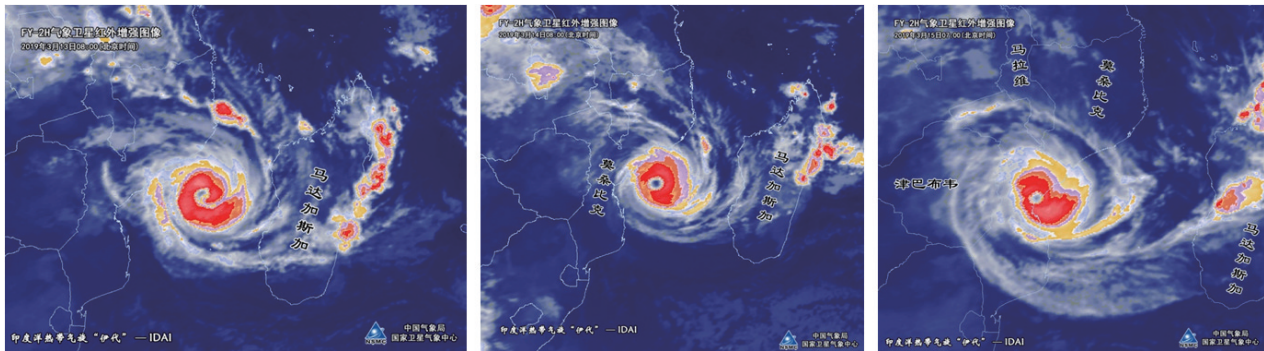
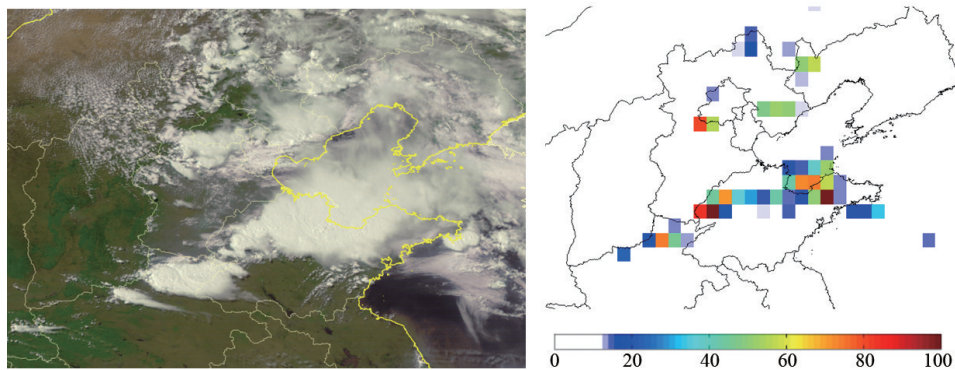


图8 2019年影响莫桑比克的强热带气旋“伊代”

风云四号A星(FY-4A)是继FY-2以后发展的新一代静止气象卫星的首颗星,于2016年12月11日成功发射,卫星上搭载先进静止轨道辐射成像仪、静止轨道干涉式红外探测器、静止轨道闪电成像仪和空间环境监测仪器等^[7]。其中,首次实现了静止轨道红外高光谱探测,可获得晴空区大气湿度三维结构。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^[8](图9)。FY-4A成像仪从FY-2的5个通道扩展到14个通道,全圆

盘图像观测时间从30 min缩短到15 min,最高空间分辨率从1.25 km提高到0.5 km。高时空分辨率成像仪数据,开展多通道快速合成技术研究,揭示快速中小尺度天气系统发展过程信息,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^[9],特别地,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果分析(图10),弥补常规探空资料的不足,延伸大气探测能力



(a) 可见光云图

(b) 闪电频次分布

图9 FY-4A/LMI闪电探测仪器观测的对流云闪电

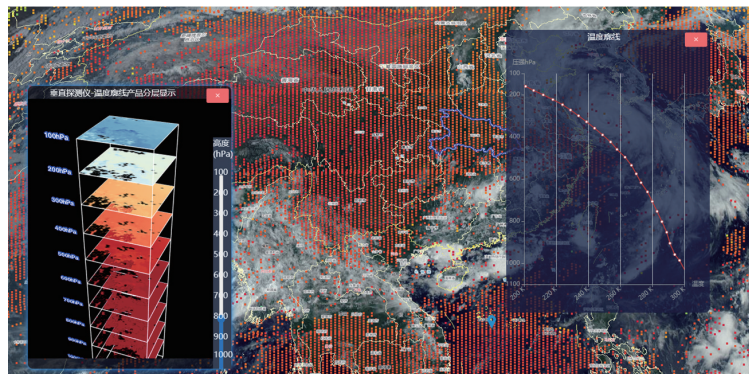


图10 FY-4A/GIIRS大气红外高光谱垂直探测仪观测点的分布、立体剖面 and 垂直廓线

至人烟稀少地区和观测资料缺乏的海洋,其机动加密监测能力加强了高影响或关键区域灾害性天气事件的预警响应处置能力^[20]。

风云三号极轨卫星的C/D星(FY-3C/D)分别于2013年9月23日和2017年11月15日成功发射,组成上下午轨道联合观测的格局,形成全球观测覆盖频次每天4次。FY-3D观测的全球天气系统(图11)可以看到,在同一天里全球共有8个热带气旋。

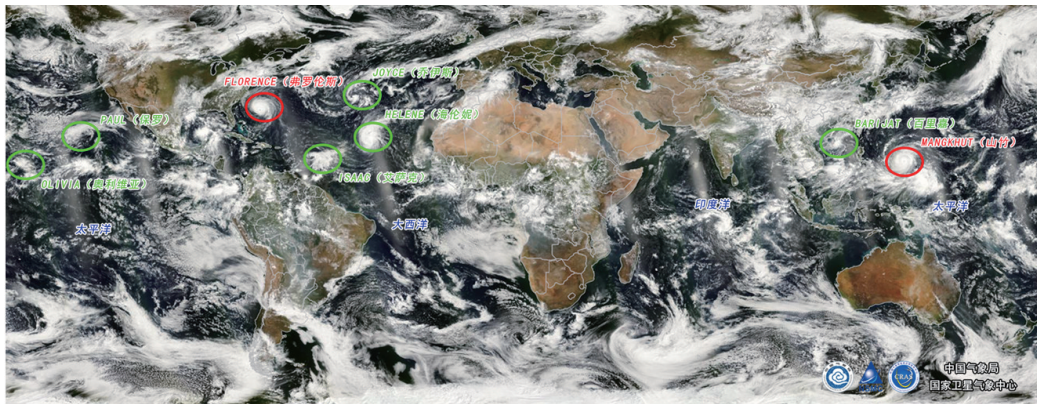
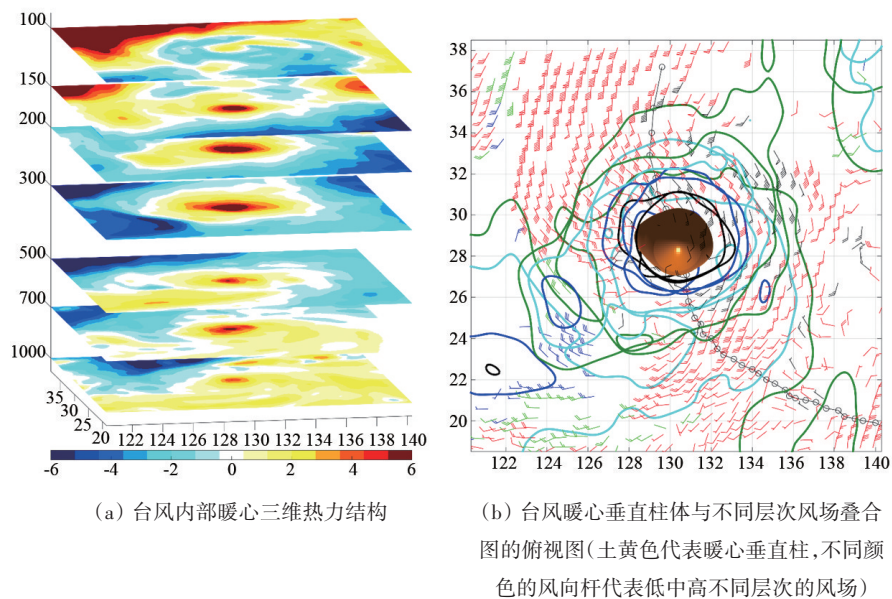


图11 FY-3D卫星全球台风监测图(2018年9月12日)

风云极轨和静止气象卫星的观测能力各有优势,多资料融合应用是重要的发展趋势。一方面,风云卫星多数据融合的应用产品能够实现一张图含有更多信息量,以多指标表现天气系统的多角度特征。例如,综合利用FY-3卫星微波探测台风内

FY-3C星载荷性能在前期FY-3A/B星基础上全面提升,微波温度计和湿度计通道分别从4个和5个提升为13个和15个,FY-3D新增高光谱大气探测仪,且中分辨率光谱成像仪通道设计较之前也有较大改进^[21]。这些能力的提升辅助形成了更丰富的反演产品,特别是对云内微物理特征参数的提取,以及探测云内部温度湿度分布有非常重要的应用价值。

部结构特征和FY-4卫星不同层次云导风的优势,形成了台风立体热动力结构新产品,能够辅助台风强度发展研判,以及FY-3云水产品与FY-4降水估计产品相结合,为预报员提供降水影响的监测结果(图12)。另外一方面,风云卫星产品与其他数



(a) 台风内部暖心三维热力结构

(b) 台风暖心垂直柱体与不同层次风场叠合图的俯视图(土黄色代表暖心垂直柱,不同颜色的风向杆代表低中高不同层次的风场)

图12 FY-3D与FY-4A融合的台风热力动力特征监测图像

据融合的应用产品,包括:综合利用FY-4分钟级云图对台风云系的跟踪功能,与GRAPES数值预报产品相结合,有利于对台风周围大环境场的分析,对

台风演变和未来趋势有更清晰的理解和准确的判断(图13)。

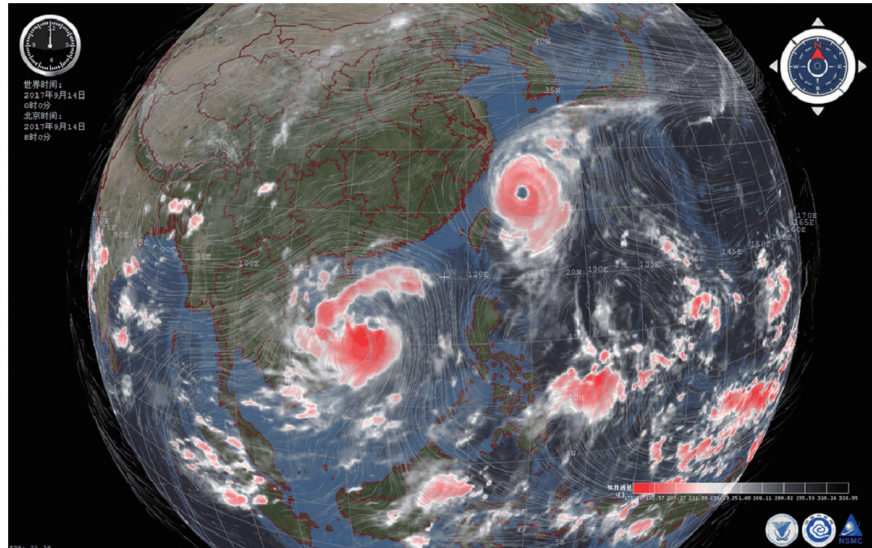


图13 卫星与数值预报模式融合应用形成的三维大气观测

4 结论

风云卫星形成的“静止”和“极轨”双系列卫星星座布局,实现了全球和区域观测优势互补的综合观测能力。2021年6月3日和7月5日,FY-4B和FY-3E先后成功发射,进一步提升了观测时空分辨率,以及填补全球晨昏时刻观测空白,目前两颗卫星处于在轨测试阶段。未来,风云气象卫星还将新增静止轨道微波探测卫星、极轨降水测量卫星等。这些新增的仪器和升级的观测能力,将进一步提高灾害性高影响天气观测的机动性、智能化、量化水平,获得以往其它手段无法实现的连续观测信息,弥补灾害性高影响天气机制分析中的缺憾和空白,促进卫星气象学理论体系的完善和发展。

参考文献(References)

- [1] 陶诗言,方宗义,李玉兰,等. 气象卫星资料在我国天气分析和预报上的应用[J]. 大气科学, 1979, 3(3): 239-246.
- [2] 陶诗言,方宗义,李玉兰. 四年来我国气象卫星资料分析应用研究[J]. 气象学报, 1983, 41(3): 263-274.
- [3] 李俊,方宗义. 卫星气象的发展-机遇与挑战[J]. 气象, 2012, 38(2): 129-146.
- [4] 赵柏林. 卫星气象的现状与展望[J]. 气象, 1987, 13(5): 1-13.
- [5] 方宗义,覃丹宇. 暴雨云团的卫星监测和研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 583-593.
- [6] 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): 6-14.
- [7] Purdom, J F W, 杜杨. 目前和将来用卫星资料作中尺度天气预报的难点及可能性[J]. 气象科技, 1988(2): 6-9.
- [8] 许健民,张其松. 卫星风推导和应用综述[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 574-582.
- [9] 方宗义. 蓬勃发展的中国卫星气象事业[J]. 气象, 1998, 20(12): 35-38.
- [10] 方宗义. 近十年使用卫星云图分析台风的评述[J]. 气象, 1982, 1: 8-12.
- [11] 宏观. 我国气象卫星及应用发展与展望[J]. 气象, 2008, 34(9): 3-9.
- [12] 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.
- [13] 张鹏,杨虎,邱红,等. 风云三号卫星的定量遥感应应用高能力[J]. 气象科技进展, 2012, 2(4): 5-11.
- [14] 姬翔,王新. 风云卫星高时空分辨率资料在热带气旋监测预报中的应用[J]. 气象科技, 2014, 42(4): 647-656.

- [15] 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.
- [16] 王新, 唐世浩, 曹治强. 风云气象卫星一带一路[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(2): 10-18.
- [17] 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.
- [18] 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
- [19] 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重的应用概述[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 20-30.
- [20] 杨军, 咸迪, 唐世浩. 风云系列气象卫星最新进展及应用[J]. 卫星应用, 2018, 11: 1-14.
- [21] 杨忠东, 刘健. 气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 592-603.

Review and vision of Fengyun meteorological satellites weather application

WANG Xin, TANG Shihao, WEI Caiying*

National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract After half a century's development, Fengyun satellites have made remarkable achievements, 19 satellites have been successfully launched and 8 are currently in orbit, forming a series of operational integrated observation networks in polar orbiting and geostationary orbiting. In the past 50 years, with the upgrading of payload on board and improvement of observation capability, Fengyun satellites have made steady progress both in methods and techniques of space weather monitoring. This paper reviews the development of Fengyun satellites and satellite meteorology and summarizes the evolution of satellite in weather application. Moreover, based on the future requirement and the planning roadmap of Fengyun satellites, the latent capacity in satellite weather application is prospected.

Keywords Fengyun satellites; tropical cyclone; rainstorm; lightning; vertical profile ●



(责任编辑 祝叶华)