

风云气象卫星发展及其应用

高浩, 唐世浩*, 韩秀珍

国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 风云系列气象卫星是我国重要的空间基础设施, 是气象现代化的重要标志。自 1988 年成功发射第 1 颗风云气象卫星以来, 我国已成功发射了两代四型 19 颗风云系列气象卫星, 目前 8 颗卫星在轨业务运行, 已形成极轨和静止 2 个系列气象卫星的组网观测体系, 实现了气象卫星系列化、业务化自主发展。风云气象卫星整体实力跻身国际先进行列, 有力支撑了气象防灾减灾, 为我国经济社会发展、“一带一路”建设等做出了重要贡献。介绍了我国风云气象卫星的发展历程, 综述了卫星数据在数值天气预报、天气监测、气候和气候变化、生态环境灾害监测、农业遥感监测和“一带一路”服务等方面的研究和应用进展, 展望了风云气象卫星的未来发展。

关键词 风云气象卫星; 卫星遥感; 气象监测

气象卫星是我国综合气象观测网络中的重要组成部分, 是雷达、地面观测站和高空观测的重要补充, 具有覆盖广、时效快、受限少等优势。气象卫星作为自然灾害监测的主要手段之一, 能对气象灾害进行有效监测, 并为灾害监测和评估提供高精度和定量的探测资料, 在防灾减灾和科学研究中作用显著。

1988 年 9 月 7 日我国成功发射第一颗风云一号 A 极轨气象卫星, 到 2021 年 8 月, 我国已成功发射了两代四型 19 颗风云系列气象卫星, 包括 9 颗极轨气象卫星和 10 颗静止气象卫星, 目前风云三号 C/D/E 极轨气象卫星、风云二号 F/G/H 和风云四号

A/B 静止气象卫星等 8 颗卫星在轨稳定运行。风云气象卫星经过 50 年的发展, 已逐步形成极轨和静止 2 个系列气象卫星的组网星座观测体系, 成功实现了从“科研试验型”到“业务服务型”的转变和气象卫星的升级换代。风云卫星是目前世界上在轨数量最多、种类最全的气象卫星星座, 我国与美国、欧盟是目前世界上少数几个同时具有极轨和静止两个系列气象业务卫星的国家和地区。

世界气象组织(WMO)已将风云气象卫星纳入全球业务应用气象卫星序列, 使风云气象卫星成为全球综合观测系统的重要成员。同时作为空间和重大灾害国际宪章的值班卫星, 风云气象卫星向全

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2021-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1506500, 2018YFC1506506)

作者简介: 高浩, 高级工程师, 研究方向为卫星遥感生态环境与地表灾害监测, 电子邮箱: gaohao@cma.gov.cn; 唐世浩(通信作者), 研究员, 研究方向为定量遥感反演理论与产品生成算法与应用, 电子邮箱: tangsh@cma.gov.cn

引用格式: 高浩, 唐世浩, 韩秀珍. 风云气象卫星发展及其应用[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 9-22; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.15.001

球 120 个国家和地区提供 100 多种数据和产品(图 1),在国际气象防灾减灾救灾和服务“一带一路”建设中发挥着日益重要的作用。风云气象卫星在天气预报、气候预测、自然灾害和环境监测、资源开发、空间天气、科学研究等多个重要领域,以及气

象、海洋、农业、林业、水利、交通、航空、航天等行业得到广泛应用,经济效益和社会效益突出,为国家经济发展、国防建设、防灾减灾和社会进步做出了重要贡献,成为我国现代化气象业务系统中重要的组成部分。



图1 全球气象卫星数据分发服务系统覆盖区域

1 风云气象卫星发展历程

1.1 风云极轨气象卫星

1988年9月7日我国自行研制的第一颗极轨气象卫星风云一号A星(FY-1A)搭乘“长征四号”运载火箭发射成功,卫星上搭载了可见光红外扫描辐射计,传回的第一幅卫星图像纹理清晰、层次丰富(图2)。FY-1A星在轨运行39天,标志我国正式成为拥有气象卫星的国家,我国气象卫星及其应用自此快速发展。1990年9月3日成功发射的风云一号B星(FY-1B)在轨正常运行158天。

1999年5月10日和2002年5月15日我国第一代极轨业务气象卫星风云一号C星(FY-1C)和D星(FY-1D)发射成功,使得我国成为世界上第2个具有全球观测能力的国家。卫星上搭载的多通道扫描辐射计通道探测数由FY-1A和FY-1B星的5个增加到10个,具备海洋水色探测能力,实现4 km空间分辨率全球定量遥感,为更精确的中长期天气预报和气候预测提供必要的基本资料。FY-1C和FY-1D星分别在轨业务运行6年半和10年,突破了长寿命稳定运行的技术瓶颈,具备了长期连续业务观测的能力。

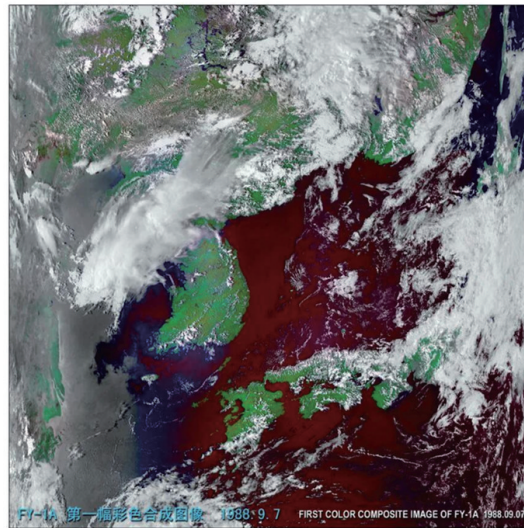


图2 风云一号A星首幅卫星影像

2008年5月27日和2010年11月5日我国第二代极轨试验气象卫星风云三号A星(FY-3A)和B星(FY-3B)成功发射,实现了我国极轨气象卫星升级换代,使我国成为世界上第2个具备上、下午星组网观测能力的国家,全球资料观测时效从12 h提高到4.5 h。星上搭载的遥感仪器包括10通道扫描辐射计(VIRR)、中分辨率光谱和成像仪(MER-SI)、红外分光计(IRAS)、微波成像仪(MWRI)、微

波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)、地球/太阳辐射监测仪(ERM/SIM)、臭氧总量和垂直分布探测仪(TOU/SBUS)和空间环境监测仪(SEM),实现了全球、全天候、全谱段、三维定量探测,最高分辨率达到 250 m,卫星技术指标达到世界先进水平^[1]。风云三号A星在轨业务运行10年,风云三号B星仍然在轨,极大的提升了我国防灾减灾和应对气候变化的能力。

2013年9月23日、2017年11月15日和2021年7月5日我国第二代极轨业务气象卫星风云三号C星(FY-3C)、D星(FY-3D)和E星(FY-3E)成功发射,形成了极轨气象业务卫星黎明、上午、下午星组网观测的业务布局。FY-3C进一步提升星载遥感仪器的在轨性能,增加了全球导航卫星(GNSS)掩星大气探测器(GNOS),提升了微波大气探测能力,微波温度计(MWTS-II)和微波湿度计(MWHS-II)发展到第二代业务型,整星性能与欧洲的METOP相当。FY-3D星搭载了10套先进的遥感仪器,除了MWTS-II、MWHS-II、MWRI、SEM和GNOS 5台继承性仪器外,红外高光谱大气探测仪(HIRAS)、近红外高光谱温室气体监测仪(GAS)、广角极光成像仪(WAI-I)、电离层光度计(IPM)为全新研制、首次上星搭载。核心仪器MERSI-II进行了大幅改进,250 m分辨率通道增加至6个,包括2个250 m红外分裂窗通道^[2]。FY-3E星搭载了11套先进的遥感仪器,除了MWHS-II是继承性仪器外,其他10套仪器均为改进型或新研,其中HIRAS-II、MWTS-III、GNOS-II、中分辨率光谱成像仪-微光型(MERSI-LL)、SIM-II、多角度电离层光度计(Tri-IPM)和SEM-II等7套仪器为改进型,风场测量雷达(Win-

dRAD)、太阳辐照度光谱仪(SSIM)和太阳X-EUV成像仪(X-EUVI)等3套仪器为全新研制、星上首次搭载。FY-3C、FY-3D和FY-3E是目前国内光谱测量通道最多、功能最全、性能最先进、精度最高的极轨遥感卫星,实现了高时效全球、全天候、全谱段观测和高精度大气垂直观测。其中FY-3E是全球首颗民用黎明轨道气象卫星,与FY-3C和FY-3D组网实现每6 h提供一次全球完整覆盖的观测资料,提升全球数值天气预报的精度和时效,同时星上新搭载的仪器实现三维大气、洋面风场、微光图像、太阳和电离层等多种要素的测量,提升对天气气候、防灾减灾和空间天气的综合监测分析能力。FY-3C和FY-3D至今一直保持稳定业务运行,FY-3E在进行在轨测试,极大提升我国生态环境监测服务能力、中长期数值天气预报支撑能力和增强我国对空间天气的监测和预警能力,为防灾减灾、国民经济建设和国防建设做出重要贡献。FY-3D星中分辨率光谱成像仪的全球真彩色拼图略见一斑(图3),我国风云极轨气象卫星的运行情况如表1所示。

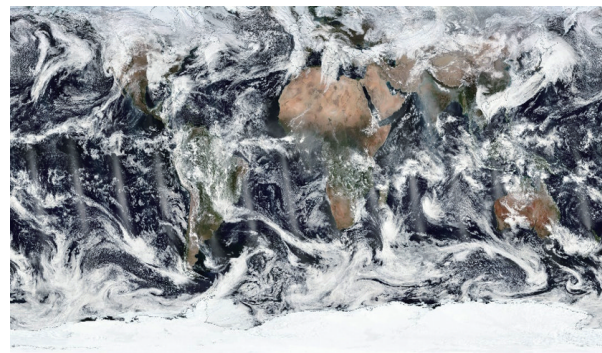


图3 FY-3D星中分辨率光谱成像仪全球真彩色拼图

表1 风云极轨气象卫星运行情况

卫星名称	代号	发射时间	性质	设计寿命/年	在轨状态
风云一号A星	FY-1A	1988-09-07	试验	2	39天
风云一号B星	FY-1B	1990-09-03	试验	2	158天
风云一号C星	FY-1C	1999-05-10	业务	2	6年半
风云一号D星	FY-1D	2002-05-15	业务	2	10年
风云三号A星	FY-3A	2008-05-27	试验	3	10年
风云三号B星	FY-3B	2010-11-05	试验	3	在轨
风云三号C星	FY-3C	2013-09-23	业务	5	在轨服务
风云三号D星	FY-3D	2017-11-15	业务	5	在轨服务
风云三号E星	FY-3E	2021-07-15	业务	8	在轨测试

1.2 风云静止气象卫星

1997年6月10日我国第一颗静止气象卫星风云二号A星(FY-2A)成功发射,定点在105°E,填补了静止轨道气象卫星空白,使我国成为第3个同时拥有静止、极轨气象卫星的国家(地区)。FY-2A卫星搭载了可见光和红外扫描辐射仪(VISSR),可获取1.25 km空间分辨率的可见光和5 km分辨率红外和水汽图像,在轨运行43 d后,卫星出现消旋系统故障,经过抢救以每天4~6 h方式间断运行10个月。2002年6月25日风云二号B星(FY-2B)成功发射,在轨运行8个月后发生数据传输系统故障,经抢救进入有限业务运行,后又发生星上探测仪器系统故障,以北半球扫描方式保持有限运行。FY-2A和FY-2B星虽然没有达到设计寿命,但有限运行时间的观测数据仍然在监测台风和海洋天气、暴雨预报、防汛服务、航空气象保障等方面发挥重要作用。

2004年10月19日和2006年12月8日我国第一代静止气象业务卫星风云二号C星(FY-2C)和D星(FY-2D)成功发射,分别定位于105°E和86.5°E,实现了我国静止气象卫星从试验应用到业务服务型的转变。FY-2C和FY-2D在性能上较静止气象试验卫星有较大的改进与提高,主载荷VISSR由试验星的3个通道增加到5个通道,并增加了星上蓄电能力,双星加密观测可以每15 min获取一幅云图,显著提高了我国静止气象卫星的观测能力^[3]。

2008年12月23日、2012年01月13日和2014年12月31日我国第一代静止气象业务卫星风云二号E星(FY-2E)、F星(FY-2F)和G星(FY-2G)成功发射,分别定位于123.5°E、112°E和99.5°E,实现了“多星在轨、统筹运行、互为备份、适时加密”的业务格局。FY-2E、FY-2F和FY-2G星可见近红外自旋扫描辐射计载荷主要技术指标以及卫星稳定性指标有所提升,FY-2F和FY-2G增加了空间环境监测器、高能粒子监测仪器。卫星在常规模式下每天能进行28张全圆盘观测,FY-2E和FY-2G星加密模式的启用,每天可进行28张全圆盘和20张半圆盘观测,FY-2F的加密模式可以实现最高频次

6 min/次的区域观测。

2018年6月5日风云二号H星(FY-2H)成功发射,为响应世界气象组织希望中国加强印度洋区域的卫星观测,避免该区域出现静止轨道气象卫星监测空白的建议,及为“一带一路”相关国家和地区以及亚太空间合作组织成员国提供气象卫星监测服务的需求,FY-2H西移至印度洋上空,定位于79°E,成为肩负服务国际社会使命的“一带一路”星。FY-2H搭载了可见近红外自旋扫描辐射计和空间环境监测器,可以实现最快30 min/次全圆盘观测,实现每天28次对“一带一路”地区的观测,提供实时云图、晴空大气辐射、云导风、沙尘等数十种遥感产品,为“一带一路”沿线国家和地区提供更加精细化的服务。

2016年12月11日我国第二代静止气象卫星试验卫星风云四号A星(FY-4A)成功发射,定位于105°E,实现了我国静止气象卫星更新换代,是当前世界上唯一能够实现三维大气动态监测的卫星,综合探测水平国际领先。FY-4A采用三轴稳定姿态控制的大型遥感平台携带多通道扫描成像辐射计(AGRI)、干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)、闪电成像仪(LMI)和空间环境监测仪(SEP)等^[4]。其中多通道扫描成像辐射计(AGRI)通道数增加至14个,空间分辨率提高了6倍,达到500 m,可实现15 min/次全圆盘观测,加密模式实现最高频次1 min/次区域观测,目前业务运行中采用每天40次全圆盘观测和165次中国区域观测。世界上首个静止轨道GIIRS,在垂直光谱探测通道上达到1700个,可对大气结构进行高精度定量探测,实现大气高精度温度、湿度廓线探测,将极大地提高天气预报准确率和精细化水平。LMI可实现1 s拍摄500张闪电图像,探测闪电的频次和强度,实现对强对流天气的监测和追踪。SEP实现太阳活动和空间环境的监测,为空间天气预报和研究提供数据。

2021年6月3日我国第二代静止气象卫星首发业务卫星风云四号B星(FY-4B)成功发射,定位于123.5°E,同FY-4A星组网,形成“双星运行、在轨备份”的业务格局。FY-4B搭载了改进型的辐射成像仪、干涉式红外探测仪和空间环境监测仪器

包,以及国际首发的快速成像仪。辐射成像仪新增7.24~7.60 μm 低层水汽通道,优化调整了部分通道光谱带宽,提供30多种云、大气、地表等定量产品;干涉式红外探测仪空间分辨率提高至12 km,可提供高光谱大气辐射和温湿度廓线产品;国际首发的快速成像仪首次实现全球静止气象卫星250 m的最高空间分辨率,实现15 min/2次全圆盘观测,最高频次1 min/次区域观测,进一步提升对台风、暴雨和中尺度灾害性天气的连续、灵活、高分辨观测能力;空间环境监测新增中能电子探测器、中能质子探测器、低能粒子探测器,为空间天气预警预报提供高中低能粒子的方向和能谱及空间磁场信息。图4是FY-4B星的首幅多通道彩色合成图,我国风云静止气象卫星的运行情况如表2所示。

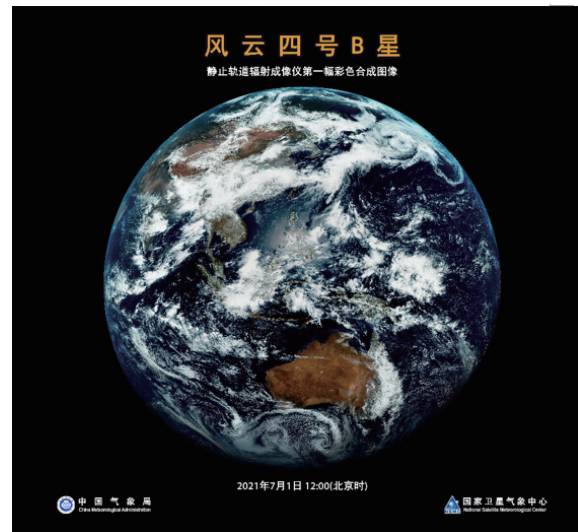


图4 FY-4B星首幅多通道彩色合成图

表2 风云静止气象卫星运行情况

卫星名称	代号	发射时间	性质	设计寿命/年	在轨状态
风云二号A星	FY-2A	1997-06-10	试验	2	10个月
风云二号B星	FY-2B	2000-06-25	试验	2	8个月
风云二号C星	FY-2C	2004-10-19	业务	3	8年半
风云二号D星	FY-2D	2006-12-08	业务	3	10年
风云二号E星	FY-2E	2008-12-23	业务	3	10年
风云二号F星	FY-2F	2012-01-13	业务	4	在轨服务
风云二号G星	FY-2G	2014-12-31	业务	4	在轨服务
风云四号A星	FY-4A	2016-12-11	试验	7	在轨服务
风云二号H星	FY-2H	2018-06-05	业务	4	在轨服务
风云四号B星	FY-4B	2021-06-03	业务	7	在轨测试

2 风云气象卫星遥感应用

气象卫星探测与其它观测相比,有许多无可比拟的优势。气象卫星探测可以提供覆盖全球、高频次、定量、长期连续的观测资料,同时卫星资料代表性、一致性、连续性、可比性好^[5]。目前风云气象卫星通过极轨和静止气象卫星上搭载的遥感仪器获取陆表、海表、大气以及近地空间的遥感数据。基于风云气象卫星已生产大气、地表环境监测和空间天气探测等数百种气象卫星图像产品、定量产品和分析产品,产品种类丰富,覆盖云和大气、陆表、海表、冰雪、辐射、闪电和空间天气等多种类型。产品精度达到业务应用要求,部分达到或优于国际先进水平,静止气象卫星产品时效优于5 min,极轨气象

卫星产品优于15 min,风云气象卫星产品如表3所示。风云卫星产品广泛应用于数值天气预报、天气监测、应对气候变化、大气成分监测、气象防灾减灾、农业气象监测、生态文明建设和空间天气监测预警等领域,在气象、应急管理、农业农村、自然资源、生态环境、水利、交通运输、能源等行业取得了良好的社会和经济效益。

2.1 数值天气预报领域应用

随着卫星资料同化方法的不断发展,以及新型风云气象卫星观测资料在国内和国外的数值天气预报中应用,显著提高了数值天气预报的精度和时效。国内方面,FY-3D和FY-4A卫星在轨测试期间,数值预报中心近实时获取测试数据并反馈改进;在轨测试后,数值预报中心优先业务获取相关

表3 风云气象卫星产品

产品类型	极轨气象卫星	静止气象卫星
云和大气	云检测、云量、云分类、云相态、云顶温度、云顶高度、云光学厚度、云导风、云粒子有效半径、雾、大气可降水、沙尘、海上气溶胶、陆地气溶胶、降水、冰水厚度指数、大气温湿度廓线、云水含量、大气顶辐射产品、臭氧总量、臭氧垂直廓线、紫外气溶胶指数、GNOS大气密度廓线、GNOS大气温度廓线、GNOS大气折射率廓线、GNOS低层大气湿度廓线、大气状态推导产品、CO ₂ 、CO、CH ₄ 、O ₂ 等大气成分产品	云检测、云分类、云相态、云量、云顶高度、云顶气压、云顶温度、云微物理和光学性质、云迹风、降水估计、对流层上部相对湿度、云垂直温湿度廓线、对流初生检测、对流层顶折叠检测、水汽总量、分层水汽、雾检测、快速大气订正云图、大气动能矢量、大气温湿度廓线、臭氧廓线、大气臭氧总含量、大气稳定度指数
陆表	全球火点、陆表反射率、植被指数、陆表温度、积雪、叶面积指数、光合有效辐射吸收系数、净初级生产力、陆表双向反射/反照率、土地覆盖、积雪覆盖、积雪深度、雪水当量、土壤湿度、干旱指数、洪涝指数	陆表温度、陆表反射率、陆表发射率、陆地气溶胶、热源点检测、沙尘检测、降水估计、降水指数、蒸散、沙尘暴指数、积雪覆盖、大雾
海表	海表温度、海洋水色、洋面风场、海冰、离水辐射	海表温度、海洋气溶胶
辐射	地球辐射、太阳辐射、射出长波辐射	地面入射太阳辐射、黑体辐射亮温、出射长波辐射、地球辐射
闪电	高能粒子、表面电位、辐射剂量、GNOS电子密度廓线、极光图像投影产品、氧氮气辉产品	闪电频次、闪电密度 高能电子、高能质子

数据产品;2018年12月,FY-4A卫星GIIRS资料在全球和区域同化和预报系统(GRAPES)中实现业务同化应用。目前FY-3D卫星的MWTS、MWRI、HIRAS和GNOS数据实现业务监测,MWHS在数值预报模式中得到同化应用,FY-4A卫星的AGRI数据实现业务监测,GIIR在数值预报模式中得到同化应用。国际上,FY-3D和FY-4A数据给威斯康星大学、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、英国气象局(UKMO)和欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)国际同行应用测试并反馈,2019年初,FY-3D和FY-4A数据业务传至EUMETSAT,并由其转发欧洲用户使用。目前ECMWF已业务化了FY-3D的MWTS、MWHS、MWRI、GNOS仪器数据,评估了FY-4A GIIRS仪器数据。UKMO利用FY-3D卫星MWTS、MWHS、MWRI、GNOS数据的联合同化试验显示对全球预报有正效果。威斯康星大学业务比较了FY-4A GIIRS与美国新一代对地观测卫星Suomi-NPP的交叉跟踪红外探测器(CrIS)、欧洲METOP星载干涉式超高光谱分辨率红外大气探测仪(IASI)数据质量情况,对预处理提出改进反馈。

对FY-3卫星3个大气探测仪和微波成像仪数据的同化应用表明,总体上仪器与国际同类仪器相

当,4个仪器的数据质量达到了数值天气预报同化应用的要求^[6]。在世界顶级的数值天气预报中心ECMWF,FY-3微波温度计和微波湿度计的同化应用结果显示,FY-3卫星大气探测资料对业务系统的预报准确度有改进,时效有所延长^[7-8]。FY-3卫星微波温度仪和微波湿度仪资料以天气研究和预报模式(WRF)三维变分系统(3DVar)为基础,在“莫拉克”台风预报中的同化应用显示,FY-3A卫星显著增强对台风的观测能力,模式初始场更好地反映台风环流形势和温湿条件,对台风路径预报有积极的改善作用(图5)^[9]。针对FY-3A同化应用、

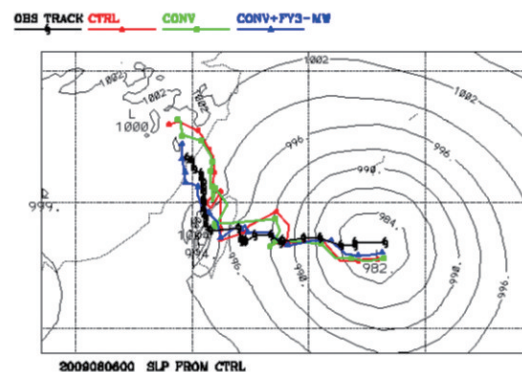


图5 FY-3A卫星微波资料对台风“莫拉克”路径预报的改进

偏差订正调整和云雨条件下亮温模拟的试验表明, FY-3A 微波资料对台风强度预报有明显改善, 用 FY-3A 资料导出的偏差订正系数可改善偏差订正结果, 并提高预报准确率^[10]。同时 FY-3 卫星数据在我国自主研发的 GRAPES 预报同化系统中的应用显示, GRAPES 模拟偏差有明显改进, 提高了南半球的预报精度。FY-2 卫星的云导风、水汽晴空辐射等数据, 经过同化试验表明有显著的应用潜力。FY-4 卫星搭载的干涉式红外大气探测仪获取的高时间、高空间和高光谱分辨率的大气温湿资料已在 GRAPES 中实现实时业务同化应用, 极大改进了数值预报初始场, 提高数值天气预报的精度。FY-4A 卫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、云导风产品、云量等产品在 GRAPES 中的应用显示, 对强对流、飚线、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都有积极的正效果。FY-4A 卫星获取晴空条件下高时效的大气温度和湿度廓线结构信息显著改进台风路径预报。

2.2 天气监测领域应用

风云系列气象卫星投入业务运行后, 风云气象卫星探测资料填补了海洋和青藏高原等区域气象观测资料的空白, 为台风、暴雨、冰雪、沙尘暴、龙卷风等灾害性天气的监测提供了有力的支撑, 使天气监测和预报更加准确及时。在台风监测中, 风云气象卫星已成为最主要的观测手段, 云图和卫星定量观测资料用于台风分析和预报后, 2000—2019 年做到了登陆我国的 150 个台风无一漏网, 大大减小了台风所造成的损失。基于风云静止气象卫星, 实现了台风初生和中心位置的监测, 包括对其强度、移动路径的估算, 以及对登录时间、地点和暴雨范围的判断^[11]等。基于新一代 FY-4A 卫星先进静止轨道辐射成像仪 (AGRI) 红外通道实现台风区域内降水分布情况的监测 (图 6), 同时其携带的干涉式大气垂直探测仪和闪电成像仪, 实现对台风雷电活动和外围环境场变化的监测。基于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^[12-13], 并获得台风大风的影响半径和强降雨面积^[14]。利用 FY-3D 微波温度、湿度亮温数据, 反演

温度和湿度廓线, 使得卫星观测的台风暖心更加合理, 缓解了低层强降水的散射造成台风暖心温度负距平异常偏低的问题。同时利用微波散射计实现了海洋洋面风速、风向信息的监测^[15], 为台风的监测预报提供重要的支撑。中央气象台基于风云静止气象卫星已先后建立了台风强度客观估计系统和台风客观定位系统, 极大的提高了我国台风业务定位定强和台风大风分布业务分析的客观定量水平, 中央气象台 24 h 台风路径预报误差逐年降低, 大大缩小了与世界先进业务中心的差距^[16]。

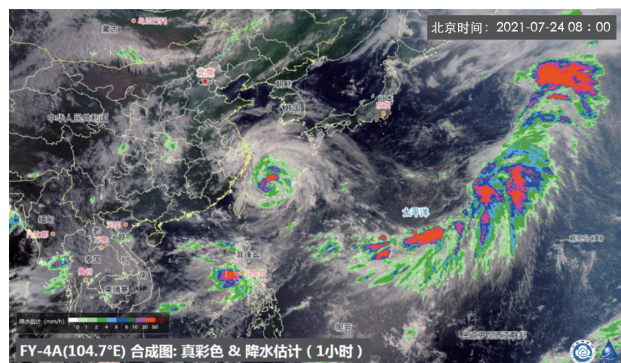


图 6 FY-4A 气象卫星台风“烟花”降水估计

在暴雨、沙尘、大雾、冰雹等中小尺度天气系统监测和预报中, 风云静止卫星发挥着十分重要的作用。静止卫星高频次、高分辨率的观测云图动画可以监测到中小尺度天气的起源、运动和发展过程, 为中小尺度天气系统提供即时预报^[17]。基于卫星遥感监测到的中尺度云团的尺度范围、持续时间和形状可对暴雨云团进行分类判识, 以及对流云团判识和冷区追踪。国内学者基于风云气象卫星开展了沙尘暴监测分析方法研究, 建立了静止卫星全波段图像沙尘暴自动识别方法^[18], 沙尘暴定量监测方法和系统^[19], 实现了沙尘面积、沙尘频次、沙尘能见度、沙尘移动路径等产品的业务应用。基于大雾在可见光波段和红外通道具有的特殊光谱和结构特性, 实现了白天和夜间大雾的判识, 以及大雾区能见度、垂直水汽含量和雾滴有效半径的监测, 同时在业务中进行了陆地大雾消散的临近业务预报^[20]。

2.3 气候和气候变化领域应用

风云气象卫星资料提供了大范围海洋、陆表和大气状态异常的信息, 为气候预测提供了依据,

在气候分析和预测中发挥了重要的作用。2011—2015年,通过解决长时间序列卫星资料定标、定位等一系列技术难题,形成了风云气象卫星和国外卫星构成的超过20年的长时间序列卫星资料与产品气候数据集,为气候和气候变化研究提供数据支撑^[21]。基于风云卫星全球观测,生产了1989—2008年总云量、植被指数、陆表温度、出射长波辐射、积雪覆盖和湖泊水体等长时间序列卫星产品,为分析冰雪变化对全球变暖、季风活动变化和降水变化等提供数据支撑。利用FY-3卫星搭载的光学和微波

传感器,形成了北极和南极的长序列海冰覆盖监测产品,实现了为极区海冰变化对气候变化的影响分析提供依据(图7)。FY-3卫星上搭载的仪器对全球气候变化的敏感因子进行了持续的观测和评估,如紫外臭氧总量探测仪实现了对全球臭氧总量分布,特别是南极和青藏高原地区臭氧异常的连续监测^[22],红外分光计对大气CO₂浓度进行探测^[23]。基于FY-3卫星的ERM和SIM进行大气层顶的辐射能量收支情况的测量,实现气候异常年份的全球短波和长波辐射的评估分析^[24]。

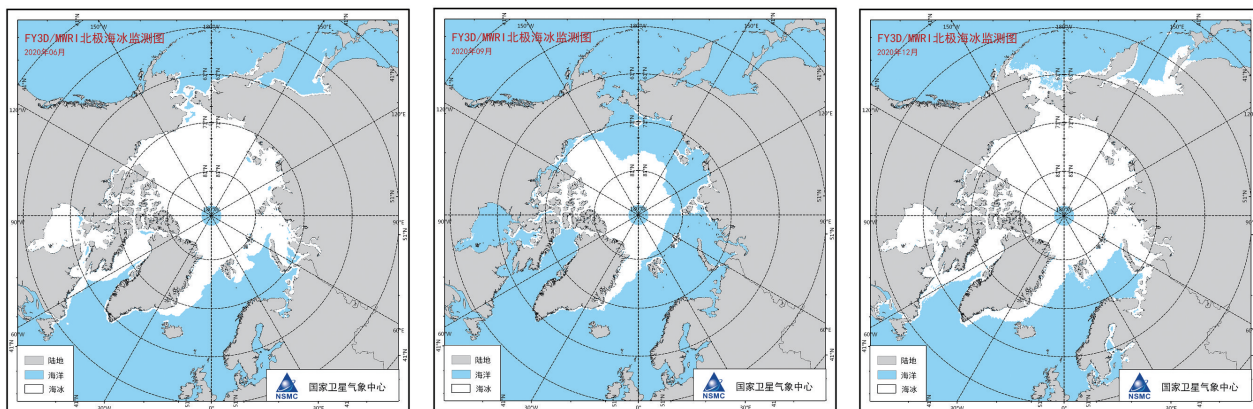


图7 FY-3D/MWRI北极海冰监测图

与风云极轨卫星相比,静止气象卫星产品具有的空间分辨率精细和时间观测频率密集的特点,也在气候和气候变化应用中发挥了重要支撑作用。基于FY-4A卫星数据建立了关键气候要素的监测业务产品,开展了以海表温度、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和结束以及我国主要季风雨带进程的气候监测应用。通过基于静止卫星建立的净入射短波辐射产品,为气候资源监测评估提供支撑,同时结合气候模式有效改善气候资源的预测能力。基于FY-4A卫星陆表温度、土壤湿度、海表温度等产品的陆面和海洋关键要素的同化应用,实现了卫星产品在气候模式中的定量应用,提升了我国在短期气候预测中的精度。基于FY-4A卫星数据开展了针对高温、干旱和冰川消融等重大气候灾害的持续监测和评估。

2.4 生态环境灾害监测应用

在洪涝灾害监测方面,风云气象卫星数据可以清晰地区分地面的水体和陆地,利用风云气象卫星已开展了中国主要江河湖泊的水体监测。在洪涝灾害发生期间,实现了洪涝水体变化动态监测和灾害评估,在1998年长江流域洪涝、2013年东北洪涝灾害和2020年南方洪涝灾害监测中,基于风云气象卫星和高分辨率卫星结合的方式,实现了洪涝灾害的精细化监测,在防灾减灾中发挥了关键作用。同时基于风云静止气象卫星,通过采用多时相合成法达到了去云效果,实现了静止气象卫星的快速、准确的洪涝变化监测^[25](图8)。在森林草原火情监测中,发挥极轨气象卫星空间分辨率高和静止卫星时间分辨率高的优势,开展了全国近实时的火情监测,生成反映火灾位置、面积、火灾蔓延预测等的火情监测和火情风险评估产品,为应急减灾部、国家

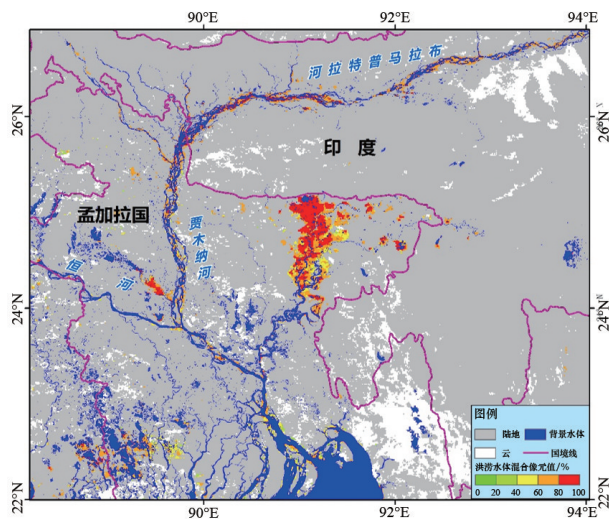


图8 FY-4A数据南亚区域洪涝变化监测图
(2018年8月18日)

林草局、农业农村部和生态环境部防火救灾提供科技支撑^[26]。当前基于风云气象卫星已实现对太湖、巢湖和滇池等全国重点湖泊的蓝藻水华的业务监测,生成蓝藻水华面积、强度等监测产品,同时开展了近海大面积浒苔、赤潮的监测,为湖泊水体和海洋生态环境治理提供决策支撑^[27]。在雪灾监测方面,利用风云卫星可见光、红外遥感数据对积雪覆盖进行监测,生成积雪覆盖、积雪持续日数等产品,利用微波遥感数据实现对积雪深度、雪水当量进行监测,为灾害评估和救灾决策提供科学依据。风云气象卫星在国内首次实现了对我国和全球气溶胶污染、霾、沙尘、火山灰和秸秆焚烧烟霾的强度和分布的实时监测^[28-29]。自2013年起开展了我国大气霾污染的定性和定量监测,生成大气霾污染程度、影响面积和其输送过程的监测分析,在大气污染防治决策服务中发挥了重要作用。

近年来,随着我国生态文明建设的深入推进,风云气象卫星在生态环境监测评估中发挥了重要的作用。在生态数据集方面,面向生态文明建设对卫星生态参数产品的需求,基于风云气象卫星开展了卫星生态参数反演算法研究,建立了卫星遥感生态基础参数长时间序列数据集,要素包括植被指数、地表温度、叶面积指数、净初级生产力、土壤湿度、积雪覆盖参数,以及建立了植被健康指数数据集和生态环境状况遥感评价指数数据集。在生态

气象保障服务方面,开展了生态红线管控和“中国天然氧吧”创建等评估服务工作,利用气象卫星、高分卫星、气象观测等多源数据,建立了基于卫星遥感的防风固沙生态功能、生物多样性维护生态功能、水土保持生态功能、石漠化敏感性评估、水源涵养生态功能评估指标,形成了生态环境状况评价模型,实现对生态红线生态环境的定量评价^[30]。基于相关研究,利用2007—2019年的气象卫星遥感数据对黄土高原地区和黄河流域生态环境状况进行了科学评估,为生态环境质量状况变化提供支撑信息(图9)。根据“中国天然氧吧”创建评定标准,利用卫星遥感研究构建了5大类12项卫星遥感指标体系,实现了森林覆盖率、区域水质、大气环境、人居环境气候舒适度和氧气释放量的评价,在已开展的2017—2020年的“中国天然氧吧”创建评定活动中发挥了积极作用,保障了评估结果的科学和权威。在生态环境的预测方面,利用静止气象卫星具有的高时空分辨率的优势特点,实现了对海洋藻类、大气环境等突发性、变化较快等生态环境事件的监测评估。同时,基于静止气象卫星,结合多源观测资料开展了更高时间频率和更精细化的生态环境发展趋势预测方面的工作尝试,为相关政府部门和用户决策服务的科学支撑。

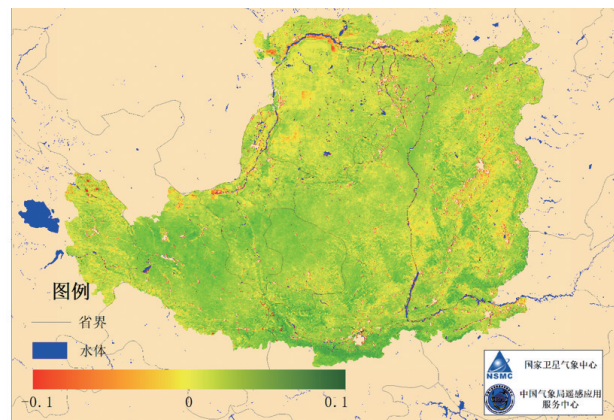


图9 2019年黄土高原生态环境质量指数变化
(2019年与2007—2014年平均值比较)

2.5 农业遥感监测应用

我国在20世纪90年代就开始推动风云气象卫星在农业遥感中的应用^[31],随着卫星技术水平、全球卫星数据获取和处理能力的提升,农业遥感监测

得到快速的发展^[32]。目前我国学者利用风云气象卫星在农作物长势、农作物分类、农作物面积与产量估算、农业气象灾害监测方面开展了大量研究工作,取得了一系列成果。在农作物长势监测中,利用FY-1号卫星2个探测通道的资料合成图像的差异实现了作物的长势监测。基于FY-3B/MERSI卫星数据的NDVI对水稻和棉花的长势监测得到了很好的效果,通过对水稻关键生育期的识别为其长势监测提供了重要信息。国家卫星气象中心已构建了全球植被指数、叶面积指数、净初级生产力等遥感反演模型,利用FY-3卫星数据构建了全球的植被指数,利用旬植被指数距平实现了全球农作物长势的定量监测评估。当前,基于风云卫星已实现了我国冬小麦、水稻、玉米、棉花等主要农作物的提取分类、种植面积监测,结果显示大宗农作物的总体分类精度在84%以上,满足了农业遥感监测的业务需要^[33-37]。通过风云气象卫星遥感对大宗作物空间分布和长势的监测、结合农业气象观测,自2015年已实现了国内以及全球主要产粮国大宗作物的长势监测和产量估算,国内粮食总产量估算准确率达到99%以上。

在农业气象灾害监测方面,国内学者利用FY-3卫星数据获得的温度植被干旱指数(TVDI)、垂直干旱指数(PDI)和蒸散干旱指数等干旱指数已经实现对我国及全球大面积农业干旱的动态连续监测,为农业生产提供及时、准确的监测信息(图10)。在实际应用中FY-3/MERSI数据具有与MO-

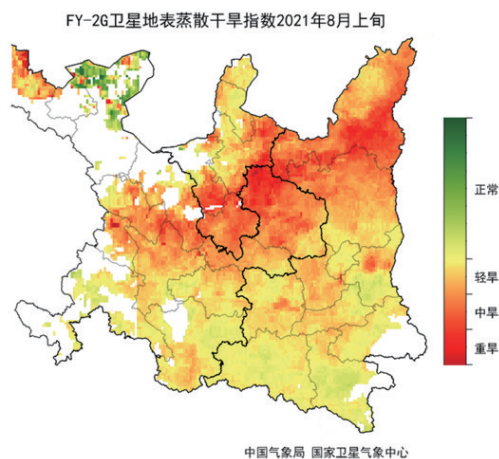


图10 FY-2G气象卫星监测陕甘宁地区旱情(2021年8月)

DIS一样的干旱监测能力,在空间和光谱分辨率方面有较大的提高,且比MODIS数据更加敏感^[38-39]。基于FY-3/VIRR数据采用地表温度分裂窗反演算法得到的TVDI指数提高了干旱的反演精度,能较好地反映农作物的干旱空间分布。基于FY-3A的PDI指数能够反映农业干旱的空间分布和动态发展,具有较高的业务应用潜力^[40-41]。此外,基于FY-3卫星的微波土壤湿度数据实现了全球农作物种植区旱情的实时动态监测,并在全球农业监测中发挥了重要的作用^[42]。自2010年,气象部门对不同卫星遥感的干旱监测模型进行了优化,建立了农业干旱监测业务方法,形成了农业干旱的卫星遥感监测业务系统。除了对农业干旱的监测外,基于FY-3卫星数据在农作物霜冻灾害监测方面也发挥了重要的作用,弥补了气象站点数据对霜冻灾害监测的不确定性和滞后性,为农业霜冻灾害的监测评估提供了及时准确的信息。

2.6 “一带一路”服务应用

为使风云气象卫星更好地为“一带一路”相关国家和地区气象防灾减灾提供服务,中国气象局调整风云气象卫星的在轨布局,2018年发射的FY-2H西移至印度洋上空加强印度洋区域的卫星观测,使风云系列静止气象卫星可有效覆盖我国全境、“一带一路”相关国家和地区、印度洋和大多数非洲国家。2018年中国气象局建立了《风云气象卫星国际用户防灾减灾应急保障机制》(FY-ESM),当风云气象卫星覆盖的国家遭受自然灾害时,可申请启动该机制,中国气象局将调动风云卫星对受灾区域进行高频次加密观测,将处理的图像和定量产品提供给申请国,为其防灾减灾提供及时的信息保障。2019年编制印发了《风云气象卫星国际服务计划》,包括风云卫星国际服务提升、风云卫星数据共享服务、风云卫星产品推广服务3个计划,旨在推动风云卫星服务“一带一路”建设,充分发挥卫星综合应用效益、提高风云气象卫星国际影响力。

近年来,风云气象卫星在增强“一带一路”地区服务方面,建设了天地一体化的风云卫星数据共享服务系统,发布卫星数据定制下载客户端软件,通

过气象卫星直收站、中国气象局数据广播系统(CMACast)、公有云客户端、绿色通道、网站等途径为用户提供快速的共享服务。建设完成了英语、俄语和阿拉伯语版的卫星天气应用平台(SWAP)和卫星遥感应用工具包软件(SMART),面向国际用户推广应用。探索建立省级“一带一路”服务分中心,与相关的国家合作研发面向“一带一路”国家的定量化气象卫星定制产品,开展适合各个国家的遥感应用服务,已形成了风云气象卫星全球监测和服务产品体系。此外,组织风云气象卫星应用培训、首届风云卫星国际用户大会以及国际遥感应用会商,通过与斯里兰卡、约旦、马尔代夫、泰国、老挝、缅甸、孟加拉国、巴基斯坦、所罗门群岛、莫桑比克等国的风云卫星国际会商,帮助相关国家技术人员掌握了风云气象卫星遥感应用技术,提升了风云气象卫星的应用能力。

截至2021年8月,使用风云卫星数据的国家数量已增加至120个,包括85个“一带一路”沿线国

家,12个国家已建立风云卫星直收站,19个国家建立了CMACast接收站,29个国家已注册成为FY-ESM用户,为吉尔吉斯斯坦、蒙古、伊朗和俄罗斯等42个国家开通了气象卫星数据绿色服务通道(表4)。2018年至2021年8月制作并发布了94期“一带一路”遥感应用服务专报,为亚洲、非洲、南美洲等多国提供台风、森林火灾、沙尘暴、暴雨、洪涝、滑坡、高温、干旱等遥感监测服务。截至2020年12月为莫桑比克、斯里兰卡、乌兹别克斯坦、孟加拉国等“一带一路”地区注册国际用户启动12次FY-ESM,及时提供风云气象卫星遥感数据、定量监测产品和服务报告。通过空间与重大灾害国际宪章机制(CHARTER)和科技部国家综合对地观测数据共享平台(CHINA-GEOSS)为“一带一路”国家提供气象灾害应急服务15次(表5),为相关国家防灾减灾提供决策服务支撑,在减少台风、洪涝等自然灾害对受灾国家造成的社会经济损失和人员伤亡方面发挥了重要的作用,扩大了风云卫星的国际影响力。

表4 风云气象卫星国际数据服务以及用户分布

服务	国家数
风云卫星数据共享服务网站	120个,包括85个“一带一路”国家和地区
风云卫星直收站	12个
风云三号软件包	29个国家,55个用户
CMACast接收站	19个
绿色数据服务通道	42个
应急机制(FY_ESM)注册用户	29个

表5 风云气象卫星服务“一带一路”国家统计

日期	国家	类型	请求来源
2018-09-12	越南	热带气旋	FY_ESM
2018-10-30	印度尼西亚	菲律宾	FY_ESM
2019-01-30	巴西	溃坝	China-GEOSS
2019-03-28	伊朗	洪水	China-GEOSS
2019-04-06	韩国	林火	CHARTER
2019-04-25	莫桑比克	热带气旋	FY_ESM
2019-06-28	俄罗斯	洪水	CHARTER
2019-08-21	玻利维亚	火灾	CHARTER
2019-09-19	莫桑比克	短临天气	FY_ESM
2019-10-10	印度	洪水	CHARTER
2019-11-14	澳大利亚	火灾	CHARTER
2019-11-27	莫桑比克	热带气旋	FY_ESM
2019-12-22	斯里兰卡	洪水	FY_ESM
2020-05-04	乌兹别克斯坦	溃坝	FY_ESM & China-GEOSS

表5 风云气象卫星服务“一带一路”国家统计(续表)

日期	国家	类型	请求来源
2020-05-06	危地马拉	火灾	FY_ESM & CHARTER
2020-05-19	孟加拉国	热带气旋	FY_ESM
2020-07-04	缅甸	溃坝滑坡	FY_ESM
2020-07-08	尼泊尔	滑坡和洪涝	FY_ESM & CHARTER
2020-09-09	俄罗斯	强降雨和洪涝	CHARTER
2020-10-13	多哥	洪涝	CHARTER
2020-11-15	菲律宾	洪涝	CHARTER
2020-11-18	哥伦比亚	飓风	CHARTER
2020-12-03	斯里兰卡	热带气旋	FY_ESM & CHARTER

3 结论

经过50年的发展,我国成功发射了19颗风云气象卫星,实现了从无到有、从跟跑到部分领先的跨越式发展,实现了系列化、业务化自主发展,风云气象卫星整体实力跻身国际先进行列,实现了世界气象卫星领域“中、美、欧”三强鼎力的国际格局,在提升气象现代化水平和服务保障生命安全、生产发展、生活富裕、生态良好以及国家安全方面最大限度地发挥了气象卫星的应用效益,气象卫星的投入产出比达1:40以上,取得了显著效益。风云气象卫星已被世界气象组织纳入全球业务应用气象卫星序列,作为全球综合观测系统的重要成员、空间和重大灾害国际宪章的值班卫星,其开放共享的数据政策使世界各地的用户广泛受益,在国际气象防灾减灾和服务“一带一路”建设中发挥着重要的作用,成为中国外交部署的闪亮名片。

2019年12月,在新中国气象事业70周年之际,习近平总书记对气象工作作出重要批示,强调气象工作关系生命安全、生产发展、生活富裕、生态良好,要加快科技创新,做到监测精密、预报精准、服务精细,推动气象事业高质量发展,提高气象服务保障能力,发挥气象防灾减灾第一道防线作用。2020年10月,李克强总理对风云气象卫星事业50周年作出批示,风云气象卫星是我国重要的空间基础设施,是气象现代化的重要标志,强调尽快建设气象强国,进一步提升防灾减灾能力,为保护生命安全、服务生产发展、促进生活富裕、建设生态文明提供有力支撑,为推动高质量发展作出更大贡献。

面对气象事业发展对风云气象卫星提出的更新、更高、更迫切的要求,我国气象卫星及其应用制定了2021—2035年的发展规划。后续研制发射的FY-3(03)批新一代极轨气象卫星,将布局包括黎明、上午、下午近极地太阳同步轨道卫星和1颗倾斜轨道降水测量卫星的4星组网全球观测体系,增强全球观测能力,实现全球数值天气预报模式每6h同化窗内全球观测资料100%覆盖,有效提高全球数值天气预报精度和时效。未来发展的FY-4微波星,将提高对极端天气、台风监测和预报的观测能力,进一步完善全球覆盖的气象遥感业务体系。

展望未来,在实现第二代极轨气象卫星FY-3黎明、上午、下午和倾斜轨道降水测星组网观测的基础上,将建立FY-5天气气候卫星综合观测体系,完成第三代极轨气象卫星的业务升级换代,显著提高全球天气气候探测精度及其稳定性;发展全球大气动力、降水测量专用卫星,满足多尺度气象预报预测需求;发展气象小卫星星座,研究星座体系下的特定大气参数的敏捷和协同观测方法。在实现第二代静止气象卫星FY-4“组网观测,在轨备份”业务布局的基础上,发展第三代静止气象卫星FY-6,形成观测服务能力、风云静止轨道卫星技术状态和对大气的综合观测能力达到世界领先水平。未来第三代风云气象卫星发展将从顶层设计上对标国家重大战略需求和国际气象卫星发展前沿,重点围绕提高天气预报准确率、增强防灾减灾快速响应能力、增强生态文明气象服务保障能力、增强精细化遥感应用服务能力等方面开展应用能力及基础支撑能力建设,按照习近平总书记的指示要求,成

为监测精密的标杆、预报精准的支柱、服务精细的示范,进一步提升防灾减灾救灾能力,为我国经济社会发展、“一带一路”建设、构建人类命运共同体等作出新的更大的贡献。

参考文献(References)

- [1] 杨军,董超华,卢乃锰,等.中国新一代极轨气象卫星—风云三号[J].气象学报,2009,67(4):501-509.
- [2] 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,2018,11:8-14.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陆其峰.风云三号A星大气探测资料数据在欧洲中天气预报中心的初步评价与同化研究[J].中国科学:地球科学,2011,41(7):890-894.
- [7] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(658): 1298-1311.
- [8] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Characterizing the FY-3A microwave temperature sounder using the ECMWF model [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 28(11): 1373-1389.
- [9] 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[J].热带气象学报,2012,28(1):23-30.
- [10] 董佩明,黄江平,刘桂青.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[J].热带气象学报,2014,30(2):302-310.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 杨军,刘健.气象卫星数据产品应用和服务发展[J].卫星应用,2014(10):18-23.
- [17] 许健民.中国气象卫星的发展及应用[J].中国科学院院刊,2013,28(增刊):50-58.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 姜灵峰.我国气象卫星资料在气象业务中的应用进展与展望[J].气象与减灾研究,2017,40(2):159-163.
- [22] 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.
- [23] 戴铁,石广玉,漆成莉,等.风云三号气象卫星红外分光计探测大气CO₂浓度通道敏感性分析[J].气候与环境研究,2011,16(5):577-585.
- [24] 张鹏,杨虎,邱红,等.风云三号卫星的定量遥感应能力[J].气象科技进展,2012,2(4):6-11.
- [25] Shao J L, Gao H, Wang X, et al. Application of FengYun-4 satellite in flood disaster monitoring through rapid multi-temporal synthesis approach[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4):1-12.
- [26] 郑伟,陈洁,唐世浩,等.FY-3D/MERSI-II远红外数据的火情监测研究[J].红外与毫米波学报,2020,39(1):120-127.
- [27] 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.
- [28] Zhang P, Zhu L, Tang S, et al. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications[J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 6, doi.org/10.3389/feart.2018.00224.
- [29] Zhu W, Zhu L, Li J, et al. Retrieving volcanic ash top height through combined polar orbit active and geostationary passive remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6):953.
- [30] 韩秀珍,唐世浩.生态保护红线卫星遥感气象保障服务能力建设综述[J].卫星应用,2018,83(11):17-19.
- [31] 方宗义,江吉喜.风云一号气象卫星在气象和农业遥感中的应用[J].红外研究,1990(2):156-161.
- [32] 许淇,李启亮,张吴平,等.风云卫星数据在中国农业

- 监测中的应用进展[J]. 气象科技进展, 2019, 9(5): 32-36.
- [33] 王馨凝, 李国春. 基于MERSI和MODIS数据的2种监督分类方法比较研究[J]. 现代农业科技, 2009(7): 266-268.
- [34] 武永利, 赵永强, 靳宁. 单时相MERSI数据在冬小麦种植面积监测中的应用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(14): 127-131.
- [35] 陈兴鹃, 黄淑娥, 祝必琴, 等. FY-3C/MERSI卫星影像水稻信息自动提取的决策树方法研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(2): 85-89.
- [36] 李峰, 王昊, 秦泉, 等. 基于HJ-1 CCD影像的玉米种植面积估算研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(2): 138-142.
- [37] 樊香所, 许文波, 范锦龙. FY-3250m分辨率数据的华北平原冬小麦提取[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 586-593.
- [38] 向大享, 刘良明, 韩涛. FY-3A MERSI数据干旱监测能力评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(3): 334-338.
- [39] 武鹏飞, 胡列群, 李贵才, 等. 基于棉田光谱的FY-3A/MERSI与MODIS植被指数关系研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(4): 49-52.
- [40] 朱琳, 刘健, 张晔萍, 等. FY-3A/MERSI数据在中国北方干旱监测中的应用[J]. 遥感学报, 2010, 14(5): 1004-1016.
- [41] 李峰, 赵玉金, 赵红, 等. FY-3A/MERSI数据在山东省农田干旱监测中的应用[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 17-22.
- [42] Zhang S, Weng F, Yao W. A multivariable approach for estimating soil moisture from microwave radiation imager (MWRI)[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34, 732-747.

China's Fengyun (FY) meteorological satellites, development and applications

GAO Hao, TANG Shihao*, HAN Xiuzhen

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

Abstract Fengyun (FY) series meteorological satellite is an important space infrastructure in China, and an important symbol of meteorological modernization. Since the first FY meteorological satellite launched in 1988, China has successfully launched 19 FY meteorological satellites. At present, 8 FY satellites are operating in orbit, and have formed an observation network system of polar-orbiting and geostationary meteorological satellites. The independent development of meteorological satellite serialization and operation has been realized. The overall strength of FY meteorological satellite coming up with international advanced ranks, which has strongly support meteorological disaster prevention and mitigation, and make great contribution to national economic and social development, "Belt and Road" construction. This paper introduces the development of FY meteorological satellites, research and application of progress in numerical weather forecasting, weather monitoring, climate and climate change, ecological and environmental disaster monitoring, agriculture monitoring, and "Belt and Road" service. The future development of FY meteorological satellite is also prospected.

Keywords Fengyun meteorological satellites; satellite remote sensing; meteorological monitoring ●



(责任编辑 祝叶华)