

谷松岩,张鹏,陈林,等.2023.中国首颗降水测量卫星(风云三号G星)的探测能力概述与展望[J].暴雨灾害,42(5):489-498. GU Songyan, ZHANG Peng, CHEN Lin, et al. 2023. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(5):489-498 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-106

## 中国首颗降水测量卫星(风云三号G星)的 探测能力概述与展望

谷松岩<sup>1,2,3</sup>,张鹏<sup>1,2,3</sup>,陈林<sup>1,2,3</sup>,商建<sup>1,2,3</sup>,张宏伟<sup>4</sup>,林曼筠<sup>1,2,3</sup>,朱爱军<sup>1,2,3</sup>,  
贾树泽<sup>1,2,3</sup>,尹红刚<sup>1,2,3</sup>,孙逢林<sup>1,2,3</sup>,徐寒列<sup>1,2,3</sup>,王皓飞<sup>1,2,3</sup>,  
李路<sup>1,2,3</sup>,吴琼<sup>1,2,3</sup>,郭杨<sup>1,2,3</sup>,窦芳丽<sup>1,2,3</sup>,武胜利<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081;2. 国家卫星气象中心,北京 100081;  
3. 许健民气象卫星创新中心,北京 100081;4. 上海航天技术研究院,上海 201109)

**摘要:**2023年4月16日09时36分(北京时间)中国首颗降水测量卫星—风云三号G星(FY-3G)成功发射,本文在介绍风云三号降水星技术特征的基础上,着重分析FY-3G降水探测能力及在暴雨监测中的应用前景。结果表明:卫星轨道高度407 km、倾角50°,搭载了Ka/Ku双频降水测量雷达、微波和光学成像仪的FY-3G卫星,可对影响中国大部分地区的台风、暴雨、强对流等灾害性天气系统三维结构进行探测。FY-3G在设计层面上,降水探测能力与目前美国第二代全球降水测量计划(GPM)核心星(GPMCO)相当,在载荷类型、数量、通道设置等方面优于GPMCO卫星。FY-3G业务运行后将与风云三号上午、下午和黎明星等其他极轨气象卫星以及风云高轨静止卫星组成风云降水探测星座体系,提升风云卫星星座的降水总体探测能力,为气象防灾减灾提供更强基础支撑。

**关键词:**风云三号降水星;降水探测能力;双频降水测量雷达;地面应用系统

**中图分类号:**P405 **文献标志码:**A **DOI:**10.12406/byzh.2023-106

### Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G

GU Songyan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Lin<sup>1,2,3</sup>, SHANG Jian<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hongwei<sup>4</sup>, LIN Manyun<sup>1,2,3</sup>,  
ZHU Aijun<sup>1,2,3</sup>, JIA Shuze<sup>1,2,3</sup>, YIN Honggang<sup>1,2,3</sup>, SUN Fenglin<sup>1,2,3</sup>, XU Hanlie<sup>1,2,3</sup>, WANG Haofei<sup>1,2,3</sup>,  
LI Lu<sup>1,2,3</sup>, WU Qiong<sup>1,2,3</sup>, GUO Yang<sup>1,2,3</sup>, DOU Fangli<sup>1,2,3</sup>, WU Shengli<sup>1,2,3</sup>

(1. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081*; 2. *National Satellite Meteorology Satellite Center, Beijing 100081*; 3. *Xu Jianmin Meteorological Satellite Innovation Center, Beijing 100081*; 4. *Shanghai Aerospace Technology Research Institute, Shanghai 201109*)

**Abstract:** Based on introducing the technical characteristics of FY-3G, which is China's first precipitation measurement satellite and successfully launched at 09:36 BT on April 16 in 2023, this paper focuses on the precipitation detection capabilities and application prospect in rainstorm monitoring of FY-3G. The results show that, with an orbit at 407 km and an inclination angle of 50°, and equipped with a dual-frequency Ka/Ku band precipitation measurement radar, microwave, and optical imaging instruments, the FY-3G satellite can detect the three-dimensional structure of disastrous weather systems such as typhoon, heavy rainfall, and other strong convection events in most of China. At the design level, FY-3G has precipitation detection capabilities comparable to the current US Second Generation Global Precipitation Measurement Program (GPM) Core Satellite (GPMCO), but better payload types, quantities, and channel settings compared with the GPMCO satellite. After the service operation, the FY-3G satellite, together with other polar-orbiting meteorological satellites such as FY-3 AM, PM, and EM, as well as high-orbit geostationary satellites, will form the Fengyun precipitation detection constellation system, which will improve the overall precipitation detection capability of the Fengyun Satellite constellation and provide stronger basic support for meteorological disaster prevention and mitigation.

**Key words:** FY-3 Precipitation measurement satellite; precipitation detection capability; dual-frequency precipitation measurement radar; ground application system

收稿日期:2023-05-25;定稿日期:2023-08-25

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFB390260X);国家重大工程(风云三号03批气象卫星工程)

第一作者:谷松岩,主要从事卫星地面系统设计与工程技术研究。E-mail: gusy@cma.gov.cn

通信作者:张鹏,主要从事卫星地面系统工程建设指挥与决策研究。E-mail: zhangp@cma.gov.cn

## 引言

降水是地球气候系统能量和水循环的重要过程之一,对降水系统瞬时结构和全球分布特征的认识,能够帮助人们理解全球气候变化。气象卫星实现了对全球海洋、沙漠、高原地区大气、云和降水等气象信息的探测,加深了对全球大气变化的认识(Kummerow, 1998)。1997年美日联合实施热带降水测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM),发射了装载降水雷达(Precipitation Radar, PR)、微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)、可见光和红外扫描仪(Visible and Infrared Scanner, VIRS)、云和地球辐射能量测量系统(Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES)和闪电成像仪(Lighting Imaging Sensor, LIS)的TRMM卫星,多种传感器联合实现了热带降水的星载探测(Kummerow, 1998)。TRMM卫星在倾角为 $35^\circ$ 的非太阳同步倾斜轨道运行了17 a,其资料在热带降水测量、降水预报准确率提高、暴雨以及热带气旋研究等方面发挥了重要作用,开启了全球降水星载遥感探测新时代,初步揭示了降水的基本气候学特征(李函璐等, 2022;杨柳等, 2022)。为了加深对全球降水的认识,TRMM之后美国接续发起了全球降水测量计划(Global Precipitation Mission, GPM),并于2014年发射了GPM核心卫星(GPM Core satellite, GPMCO)。GPMCO卫星以 $65^\circ$ 倾角运行在高度为407 km的非太阳同步倾斜轨道,借助比TRMM/PR功能更强的Ka/Ku双频降水测量雷达(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR),精确获取地球南北纬 $65^\circ$ 范围内的降水信息,并借助虚拟星座获取全球降水信息,进一步加深了人们对降水三维精细结构和全球分布特征的认识(王立羽和傅云飞, 2022;傅云飞等, 2023;韩芙蓉等, 2023)。

台风、暴雨、强对流等是中国重要的灾害性天气,为此从2006年起中国气象局对标国际前沿,与中国航天科技集团紧密合作,逐步推进风云三号降水星的立项研制和科技攻关。风云三号降水星通过星载主、被动微波与地基天气雷达的融合应用实现观域内大气、云和降水结构探测,揭示降水系统三维结构,深化对降水和云微物理特征的科学认识;提升台风、暴雨和其他极端灾害性天气监测预报精度,在生态环境、能源、农业、健康等领域发挥重要作用。

2023年4月16日09时36分(北京时),中国首颗降水测量卫星—风云三号07星搭乘长征四号乙遥五十一运载火箭,在酒泉卫星发射中心成功发射,准确入轨。风云三号07星完成发射任务卫星入轨后,进入在轨业务卫星序列,排序为风云三号G星(FY-3G)。目

前FY-3G降水星在轨运行正常,主、被动微波载荷已开机获取首图,在轨测试后将开启业务运行模式,提供台风、暴雨等降水系统的三维结构信息。风云三号后续规划中,风云三号04批的09星为风云三号第2颗降水测量卫星,将与FY-3G降水星在轨组网实现降水的星载主动测量。本文在介绍中国首颗降水测量卫星(FY-3G)平台及载荷特征的基础上,分析FY-3G降水星的降水探测能力及在暴雨监测中的应用前景,以期改进暴雨预报提供参考。

## 1 FY-3G降水星技术特征

FY-3G降水星的在轨业务应用填补了中国星载主动降水探测技术的空白,实现了星载Ka/Ku双频降水测量雷达探测降水系统三维结构信息,同时也使风云卫星成为国际上唯一拥有上午、下午、晨昏和倾斜四条低轨业务气象卫星的卫星系列。FY-3G降水星除业务工作模式外,还设计了特殊的目标观测模式,根据降水系统发生发展过程的特殊探测需求,通过卫星平台机动功能实现目标观测,有效获取降水系统三维结构信息,为研究降水发生发展过程中的潜热释放特征提供重要支撑。

### 1.1 率先使用中继技术实现降水星数据传输

FY-3G降水星为了弥补依靠国内地面站接收时因16 h不见站所带来的资料时延,在国内民用系列遥感卫星中率先使用中继技术实现降水星数据传输,构建了由国内佳木斯、喀什和广州气象卫星地面接收站及中继卫星组成的天地一体化数据接收站网,完整接收降水星全部观测数据,数据时效达到3 h。降水星中继数传链路中,在地面集成运行控制系统的统一调度协调下,西安卫星测控中心协调安排中继测站,并负责申请测控数传中继跟踪计划,中继控管中心负责分配中继数传资源,降水星地面数据接收系统完成降水星星地一体化数据接收处理。依托降水星天地一体化的数传站网,利用FY-3G降水星与风云其他太阳同步轨道及静止轨道卫星的交汇特征,可以将降水星上装载的高精度定标器及微波辐射成像仪辐射定标结果传递到所有风云卫星相关载荷,打通辐射基准的空间传递链路,支撑建立风云辐射基准体系。

### 1.2 系统设计独具特色

FY-3G降水星卫星工程任务由卫星系统、运载火箭系统、发射场系统、测控系统、地面系统 and 应用系统等六大系统组成。FY-3G降水星运行在独特的低倾角非太阳同步倾斜轨道上,标称轨道高度407 km,倾角 $50^\circ$ ,可覆盖全球中低纬度地区。卫星设计寿命6 a,卫星基于SAST-3 000卫星公用平台,有效载荷系统由

降水测量雷达(Precipitation Measurement Radar, PMR)、降水型微波成像仪(MicroWave Radiance Imager-Rainfall Measurement, MWRI-RM)、降水型中分辨率光谱成像仪(ModErate-Resolution Spectroradio-meter Imager-Rainfall Measurement, MERSI-RM)、全球导航卫星掩星探测仪(Global Navigation satellite Occultation Sounder, GNOS)、短波红外多角度偏振成像仪(Shortwave infrared Multi Angle Polarization Imager, PMAI)、数传和数传中继终端等分系统组成。载荷配置见图1。

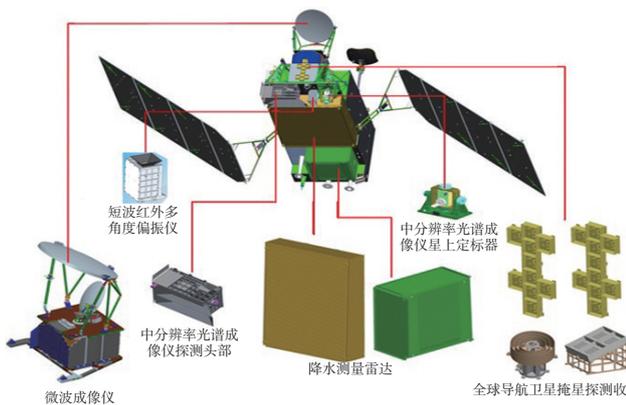


图1 FY-3G降水星载荷配置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the payload configuration on FY-3G

FY-3G降水星运行的低轨非太阳同步倾斜轨道,具有大气密度变化快、太阳光照条件和空间外热流变化复杂、原子氧效应显著等特点,卫星平台针对轨道特点进行了全新设计,具有滚动、俯仰和偏航等三轴机动能力。

FY-3G降水星为了能够实现预报牵引下降水系统的目标探测,以及探测结果与预报模式的同化应用,设计了目标观测模式,在侧摆最大 $22^\circ$ 的情况下,有效捕获台风、暴雨系统三维结构信息,支撑建立预报-探测-预报的闭合环路,探索支撑中国暴雨预报精度提升的技术新途径。

### 1.3 载荷系统实现一体化设计

为了实现降水观测的科学目标,FY-3G降水星配置装载了主被动微波降水测量载荷及光学成像载荷,同时搭载了短波近红外多角度偏振成像仪和高精度定标器两台试验载荷。FY-3G降水星装载的双频PMR,采用Ku和Ka双频技术观测台风、暴雨等降水的三维滴谱特性,其测量参数独立于背景辐射且与降水直接相关,可以反演得到比被动遥感更准确的降水强度,还可以获得降水类型、降水层高度等其他丰富的降水信息。

FY-3G降水星上装载的MWRI-RM,是风云三号02批微波成像仪(MicroWave Radiance Imager, MWRI)的升级版,通过成像与探测功能的一体化设计,在原有功能和性能的基础上,在54 GHz氧气吸收带以及

118 GHz氧气吸收线附近各增加了一组探测通道,利用双氧吸收通道的共轭反演技术提升陆地弱降水探测能力,同时在183 GHz水汽吸收线附近辅助增加了大气湿度廓线探测能力。FY-3G降水星上装载的MWRI-RM探测通道数达到26个。

FY-3G降水星上装载的MERSI-RM是FY-3G降水星配置的光学成像类仪器,各通道星下点空间分辨率均为500 m,可以获取可见光/红外云图、云顶温度、云顶高度、有效粒子半径等云的宏微观物理参数,配合主被动微波载荷实现降水和云雨大气参数遥感探测。

FY-3G降水星上装载的全球导航卫星掩星探测仪II型(Global Navigation satellite Occultation Sounder, GNOS-II)在继承风云三号E星掩星和反射信号一体化探测基础上,提供在轨实时滤波精密定轨结果,在四百多公里轨道高度上,有望实现基于精密定轨的轨道大气密度反演和更高精度的海面风场及土壤湿度等产品的反演。

除上述主载荷外,FY-3G降水星还搭载了短波红外多角度偏振成像仪和太阳反射波段高精度定标器,开展风云气象卫星新技术验证。降水星载荷配置中PMR和PMAI等为新研载荷,风云三号其他卫星上均未设计配置;MWRI-RM和MERSI-RM为原风云三号MWRI和中分辨率光谱成像仪(ModErate-Resolution Spectroradio-meter Imager, MERSI)的升级产品,全新设计了载荷结构和通道配置;GNOS-II完全继承风云三号E星产品。从表1给出的FY-3G与国际上其他降水测量卫星载荷配置可见,FY-3G不仅具备GPM主、被动微波降水探测的能力,同时还具有降水前期物云和气溶胶的探测能力,从载荷配置上来看FY-3G远优于GPM。

### 1.4 地面系统承载星地全流程业务运行

FY-3G降水星地面系统由数据接收、集成运控、数据预处理、产品生成、计算机与网络、数据存档与服务、产品质量监控、仿真与开发、共性技术与支撑、大型试验、天地一体化检验验证系统和轨位与频率保护等12个技术系统组成。FY-3G降水星入轨后将以X频段向全球广播实时数据,用Ka频段与中继卫星实现数据星间传输。数据接收站网在集成运行控制中心的统一调度下,结合中继卫星进行数据获取,并将获取的数据传送到数据处理中心。图2是FY-3G降水星地面系统业务架构。

FY-3G降水星通过数据预处理系统生产L1科学数据,负责将卫星各遥感仪器获取的原始数据转换为由观测目标自身辐射特性决定的具有确定位置和辐射强度的物理量。同时具备完善的状态监测功能与交叉比对、定标精度检验验证功能。

表1 低轨卫星降水测量载荷配置及可测关键地球物理参数比较

Table1 Comparison of load configuration and key geophysical parameters for low-orbit precipitation measurement satellite

载荷配置及可测 关键参数	低轨卫星				
	FY-3G	TRMM	GPM	JPSS	EPS-SG-A/B
降水测量载荷	PMR				
	MWRI-RM	PR			
	MERSI-RM	TMI	DPR	ATMS	MWI
	GNOS-II	VIRS	GMI	VIIRS	MWS
	PMAI HAOC	CERES			
可测关键地球 物理参数	降水三维结构、降雨率、混合层特性、水凝物、大气可降水、大气温湿度廓线、地表温湿度和云、气溶胶参数	降水三维结构、降雨率、混合层特性、水凝物、大气可降水、地表温湿度	降水三维结构、降雨率、混合层特性、水凝物、大气可降水、地表温湿度	降雨率、水凝物、大气可降水、大气温湿度廓线等	降雨率、水凝物、大气可降水等

注: FY-3G 为中国研制的风云三号降水测量卫星, 2023年4月16日发射卫星; TRMM 为美日联合研制的热带降水测量卫星, 1997年发射, 在轨运行 17 a 后退役; GPM 为美日联合研制的全球降水测量卫星, 2014年发射, 目前在轨运行; JPSS 为美国研制的美国联合极轨卫星系统, 2017年发射, 目前在轨运行; EPS-SG-A/B 为欧洲气象卫星应用组织研制中的欧洲第二代气象卫星, 分 A/B 两个系列, 分别计划装载微波探测仪(A)和微波成像仪(B)。PMR、MWRI-RM、MERSI-RM、GNOS-II、PMAI、HAOC 分别表示双频降水测量雷达、降水型微波成像仪、降水型中分辨率光谱成像仪、GNSS掩星探测仪、近红外偏振成像仪、高精度定标器; PR、TMI、VIRS、CERES 分别表示降水测量雷达、TRMM 微波成像仪、可见光红外扫描仪、云和地球辐射能量系统; DPR、GMI 分别表示双频降水测量雷达、微波成像仪; ATMS、VIIRS 分别表示先进技术微波探测仪、可见光红外成像辐射计; MWI、MWS 分别表示微波成像仪、微波探测仪。下表同。

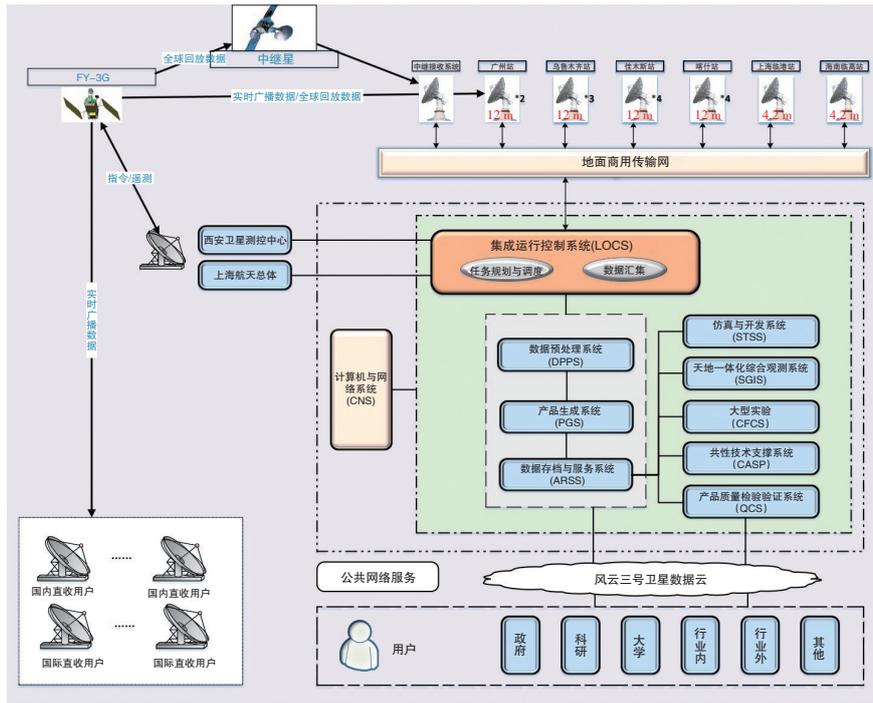


图2 FY-3G降水星地面系统业务架构

Fig.2 Operational architecture of FY-3G ground segment

FY-3G 降水星以探测全球中低纬地区降水为主要科学目标, 同时充分发挥配置载荷的探测能力, 生产包括云辐射类、海陆表类、大气参数类、空间天气类共计 4 类 24 种主要地球物理参数, 包括覆盖南北纬 50° 范围内的降水/降雪, 满足世界气象组织全球综合观测系统 (WMO Integrated Global Observing System, WIGOS) 的主要需求。全新研发了探测降水内部精细结构的三维雨滴谱参数廓线、三维相态、三维降水率廓线等新型遥感产品。主要产品见表 2。

FY-3G 降水星地面系统的计算与数据资源服务采用基于云网融合异构混合云架构, 为业务应用提供数算一体的数据和 IT 资源支撑平台, 实现了业务数据全流程质量监视。

FY-3G 降水星数据存档与服务系统整体采用面向服务的架构, 遵循国标质量规范体系进行设计, 提升服务管理的智能化水平。构建了基于混合云全新数据获取、管理、分发与服务体系, 设计研发云网融合一体化数据服务接口, 并通过统一的数据接口为上层

表2 FY-3G降水星主要产品表

Table 2 The main products of FY-3G

产品类型	产品名	仪器名
云辐射类	云检测	MERSI-RM
	云量	MERSI-RM
	云相态和云类型	MERSI-RM
	云顶性质(温度、高度、压强)	MERSI-RM
海、陆表类	陆表温度	MERSI-RM MWRI-RM
	雪深/雪水当量	MWRI-RM
	土壤水分	MWRI-RM
	土壤冻融	MWRI-RM
	比辐射率	MWRI-RM
	海表温度	MERSI-RM MWRI-RM
	海面风速	MWRI-RM GNOS-II
	大气可降水	MERSI-RM MWRI-RM
	降水(地面降水、降水率)	MWRI-RM PMR
	云水含量	MWRI-RM
大气参数	大气温度廓线	MWRI-RM
	掩星大气(大气弯度角、大气折射率、大气密度、大气温湿度廓线)	GNOS-II
	亮带检测	PMR
	降水类型	PMR
	降水相态	PMR
	等效雷达反射率因子廓线	PMR
	三维雨滴谱参数廓线	PMR
	三维降水率廓线	PMR
	潜热	PMR
	空间天气类	电子密度廓线

各遥感应用及众创社区应用提供数据资源服务,实现多平台分布式数据统一管理,提升数据服务能力和平台效益。图3是多中心协同数据检索订购与共享服务业务流程示意图。

为加强对数据产品质量的管理,数据存档与服务系统还建设了数据全流程质量监控展示系统,对数据自接收、传输、处理至分发与服务的全流程进行数据质量监视,及时展示数据的完整性、各级数据质量检验结果以及服务的时效性等关键信息。

## 2 FY-3G降水星降水探测能力

FY-3G降水星依托其装载的双频降水测量雷达,结合微波和光学成像仪,以及地基天气雷达,实现对台风、暴雨等灾害性天气系统的监测,提供全球中低纬地区降水系统的三维结构信息,同时利用降水测量雷达校准同平台的宽刈幅被动微波成像仪降水测量

精度,并向风云三号综合星以及风云其他型号卫星传递降水测量结果,最终形成30 min、0.1°的高时空分辨率的降水数据集。

### 2.1 Ka/Ku双频雷达降水探测能力

FY-3G降水星装载的Ka/Ku双频降水测量雷达(PMR),是单极化一维相控阵雷达,在轨可以进行侧摆机动观测。降水测量雷达是降水测量卫星的核心载荷,表3归纳了国内外星载降水测量雷达的主要性能参数指标。FY-3G/PMR和GPM/DPR相比于TRMM/PR都增加了Ka频段雷达,能够获得比单频雷达更高精度的降水测量结果。在水平分辨率相当的情况下,风云三号降水测量雷达的刈幅宽度大于PR和DPR,从而可以捕捉到更多的降水事件。另外,风云三号降水测量雷达的天线旁瓣电平低于PR和DPR,有利于抑制地面杂波的影响、减小测量误差。对比分析表明,风云三号降水测量雷达与在轨的GPM/DPR降水探测能力相当,优于TRMM卫星PR的降雨测量能力(吴琼,2013a,2013b;尹红刚等,2016;陈洪滨等,2020)。

FY-3G降水星成功发射精确入轨后降水测量雷达顺利开机,并于2023年5月7日观测到华南暴雨云系。图4是观测得到的原始回波,可以清晰看到Ku、Ka两个频段的降水、地表和镜像回波。从降水回波中可以清晰分辨出降水核的位置,而从地表回波中可以清晰看到回波从中间向两边逐渐减弱的分布特征。Ka频段降水系统基本没有产生镜像回波,Ku频段镜像回波明显。

### 2.2 微波成像仪降水探测能力

微波成像仪是星载降水探测的重要载荷。风云三号系列卫星的微波成像仪包括MWRI、MWRI-II和MWRI-RM三种型号,其中MWRI-II在10~118 GHz频段设置了双极化通道,装载在综合卫星平台上;MWRI-RM在10~183 GHz频段设置了双极化通道,装载在降水测量卫星平台上。气象卫星上装载的微波成像仪为降水测量提供了宽刈幅观域,表4给出目前和未来即将在轨的代表性微波成像仪的频点设置参数,包括FY-3/MWRI、FY-3/MWRI-II、FY-3/MWRI-RM、GPM/GMI(Draper et al., 2015)和欧洲下一代极轨业务气象卫星EPS-SG上装载的用于降水测量的微波成像仪(MicroWave Imager, MWI)(Nigel, 2019)。表5给出FY-3G/MWRI-RM通道性能指标。可见FY-3/MWRI-RM相比GPM/GMI多了52.0 GHz和118.0 GHz两组大气氧气吸收线附近的8个探测通道,双氧吸收通道联合对陆地弱降水以及融化层位置及厚度的探测等具有优势。欧洲后续业务气象卫星EPS-SG上计划装载的MWI也设计配置了双氧吸收通

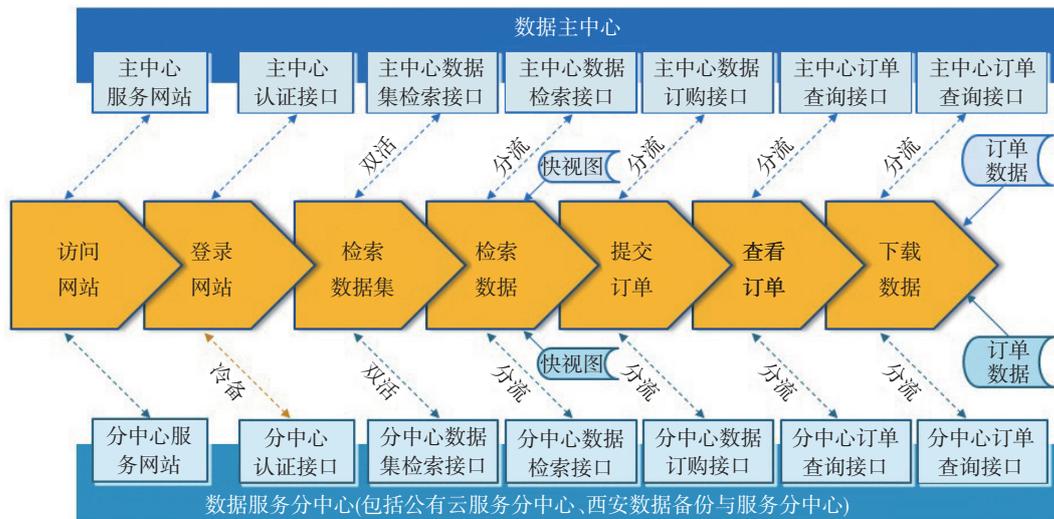


图3 FY-3G降水星多中心协同数据检索订购与共享服务业务流程示意图

Fig.3 Schematic diagram of the operational process for multi-center collaborative data retrieval, ordering, and sharing services of FY-3G

表3 三种星载降水测量雷达主要性能参数对比

Table 3 Comparison of main performance parameters of three spaceborne precipitation measurement radars

性能参数	频段	地面刈幅/km	天底点水平分辨率/km	距离分辨率/m	最小可检测降水强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	最小可检测回波强度/dBz	动态范围/dB	测量精度/dB	天线峰值旁瓣电平/dB
FY-3G/PMR	双频 Ku/Ka	303	5	250	0.5 (Ku)/0.2 (Ka)	18 (Ku)/12 (Ka)	≥70	≤±1	≤-30
GPM/DPR	双频 Ku/Ka	245 (Ku)/115 (Ka)	5	250 (Ku)/250、500 (Ka)	0.5 (Ku)/0.2 (Ka)	18 (Ku)/12 (Ka)	≥70	≤±1	≤-25
TRMM/PR	单频 Ku	245	5	250	0.7 (Ku)	21 (Ku)	≥70	≤±1	≤-25

注:雷达天底点(在卫星标称高度407 km时)水平分辨率就是水平分辨距离,由雷达波束宽度决定;降水测量雷达作为主动探测设备具备三维空间分辨能力,距离分辨率是指沿波束前进方向上的分辨能力(方向与波束展开方向相垂直),由发射的短脉冲宽度决定;最小可检测降水强度与最小可检测回波强度满足 $Z_e = 200R^{1.6}$ 。

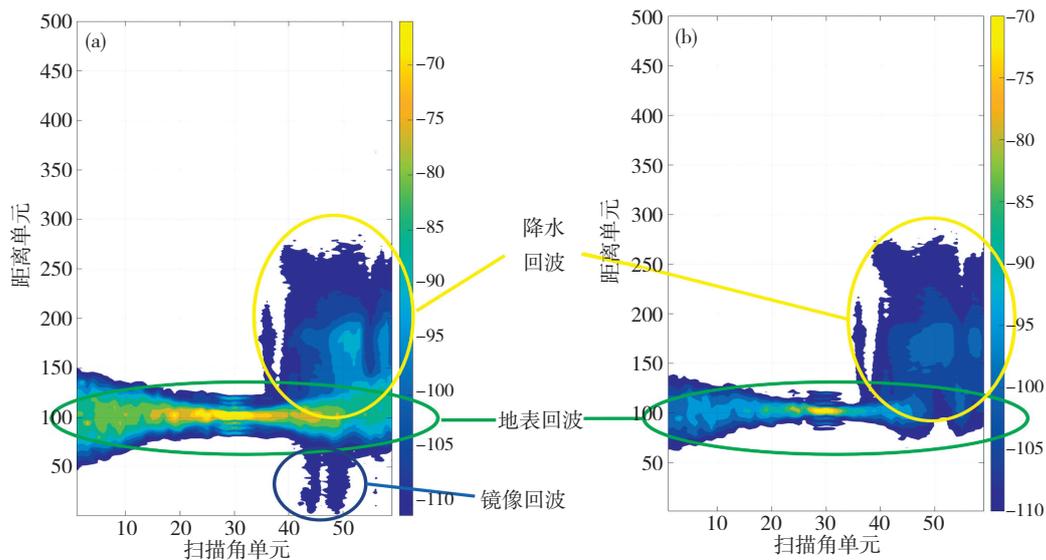


图4 2023年5月7日FY-3G降水星降水测量雷达(PMR) Ku频段(a)、Ka频段(b)观测的华南暴雨云系原始回波(单位: dBz)

Fig.4 Original echo of rainstorm cloud system in South China observed by Precipitation Measurement Radar (PMR) in (a) Ku band and (b) Ka band of FY-3G on 7 May 2023 (unit: dBz)

道,但FY-3/MWRI-RM多了低频10.6 GHz的双极化通道,对陆地强降水探测具有优势。研究表明FY-3/MWRI-RM与未来在轨的EPS-SG/MWI性能相当,优

于GPM/GMI(谷松岩,2022)。

陆地弱降水是星载微波降水反演的难题。在利用传统微波窗区通道反演降水的技术中,来自地表复

表4 代表性微波成像仪通道频点设置

Table 4 Channel frequency point setting of typical Microwave Imager

FY-3/MWRI-RM	FY-3/MWRI-II	FY-3/MWRI	GPM/GMI	EPS/MWI
10.65 (V/H)	10.65 (V/H)	10.65 (V/H)	10.65 (V/H)	/
18 (V/H)	18 (V/H)	18 (V/H)	18.70 (V/H)	18.70 (V/H)
23.8 (V/H)	23.8 (V/H)	23.8 (V/H)	23.8 (V)	23.8 (V/H)
31.4 (V/H)	31.4 (V/H)	31.4 (V/H)	36.5 (V/H)	31.4 (V/H)
50.30 (V/H)	50.30 (V/H)	/	/	50.30 (V/H)
52.61 (V/H)	52.61 (V/H)	/	/	52.61 (V/H)
53.24 (V/H)	53.24 (V/H)	/	/	53.24 (V/H)
53.75 (V/H)	53.75 (V/H)	/	/	53.75 (V/H)
89.0 (V/H)	89.0 (V/H)	89.0 (V/H)	89.0 (V/H)	89.0 (V/H)
118.7503±3.2 (V)	118.7503±3.2 (V)	/	/	118.7503±3.2 (V)
118.7503±2.1 (V)	118.7503±2.1 (V)	/	/	118.7503±2.1 (V)
118.7503±1.4 (V)	118.7503±1.4 (V)	/	/	118.7503±1.4 (V)
118.7503±1.2 (V)	118.7503±1.2 (V)	/	/	118.7503±1.2 (V)
166 (V)	/	/	/	165.5±0.75 (V)
183.31±2.0 (V)	/	/	/	183.31±2.0 (V)
	/	/	183.31±3.4 (V)	183.31±3.4 (V)
183.31±4.9 (V)	/	/	/	183.31±4.9 (V)
	/	/	/	183.31±6.1 (V)
183.31±7 (V)	/	/	183.31±7 (V)	183.31±7.0 (V)

注:FY-3F/H两颗卫星上计划装载微波成像仪MWRI-II, FY-3F计划2023年8月发射, FY-3H计划2025年发射;FY-3A/B/C/D卫星上装载微波成像仪MWRI;欧洲下一代极轨业务气象卫星(EPS/MWI),计划2024年投入业务。“/”表示无。

表5 FY-3G微波成像仪(MWRI-RM)通道性能指标

Table 5 Specification of the performance indicators for Microwave Radiance Imager-Rainfall Measurement (MWRI-RM) of FY-3G

中心频率/GHz	动态范围/K	灵敏度/K	测量精度/K	极化隔离度/dB
10.65	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
18.70	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
23.80	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
36.50	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
50.30	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
52.61	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
53.24	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
53.75	3~340	0.5	0.8/0.8	≥20
89.00	3~340	0.5	0.9/0.8	≥20
118.7503±3.20	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
118.7503±2.10	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
118.7503±1.40	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
118.7503±1.20	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
165.5±0.75	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
183.31±2.00	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
183.31±3.40	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20
183.31±7.00	3~340	0.8	1.2/0.8	≥20

杂强大的背景微波辐射会完全掩盖大气弱降水的发射、吸收和散射信号。晴空背景差、极化亮温差等方法均试图利用辐射变化量反演降水,但也均遇到了地

表极化差强弱不一、晴空亮温推算误差大等问题的困扰。FY-3G/MWRI-RM分别在50~54 GHz和118 GHz大气氧气吸收线附近设置了两组探测通道,对于同一中心频点的一组通道而言,地表比辐射率相同,降低了反演方程的非适定性,可以反演得到陆地弱降水。图5是FY-3G/MWRI-RM根据在轨实际观测资料得到的典型通道一周轨道亮温合成图,其中图5a是MWRI-RM传统窗区通道一周轨道亮温合成图,赤道辐合带上空的高亮温区反映了降水云团在洋面冷背景上的微波发射信息,与降水强度密切相关;同时传统微波窗区通道对海陆和内陆水体等十分敏感,在亮温图像上均能清晰分辨出海陆和内陆水体(图5a中A区)。图5b、c是MWRI-RM氧气吸收带53.24 GHz和氧气吸收线118 GHz附近的等权重双氧吸收通道一周轨道亮温合成图,双氧吸收通道对下垫面不敏感,从亮温图像上看不到海陆亮温差异(图5b、c中A区),同时中国南方太湖和鄱阳湖内陆水体在双氧吸收通道亮温图像上也未见明显亮温差异(图5b中A区);双氧吸收通道图像中赤道辐合带上空的亮温低值与传统通道中的高值相对应,亮温差异反映了降水系统内部水凝物的散射特征;而南美地区陆地上空的降水系统虽然在传统通道亮温图像中信号很弱(图5a中C区),

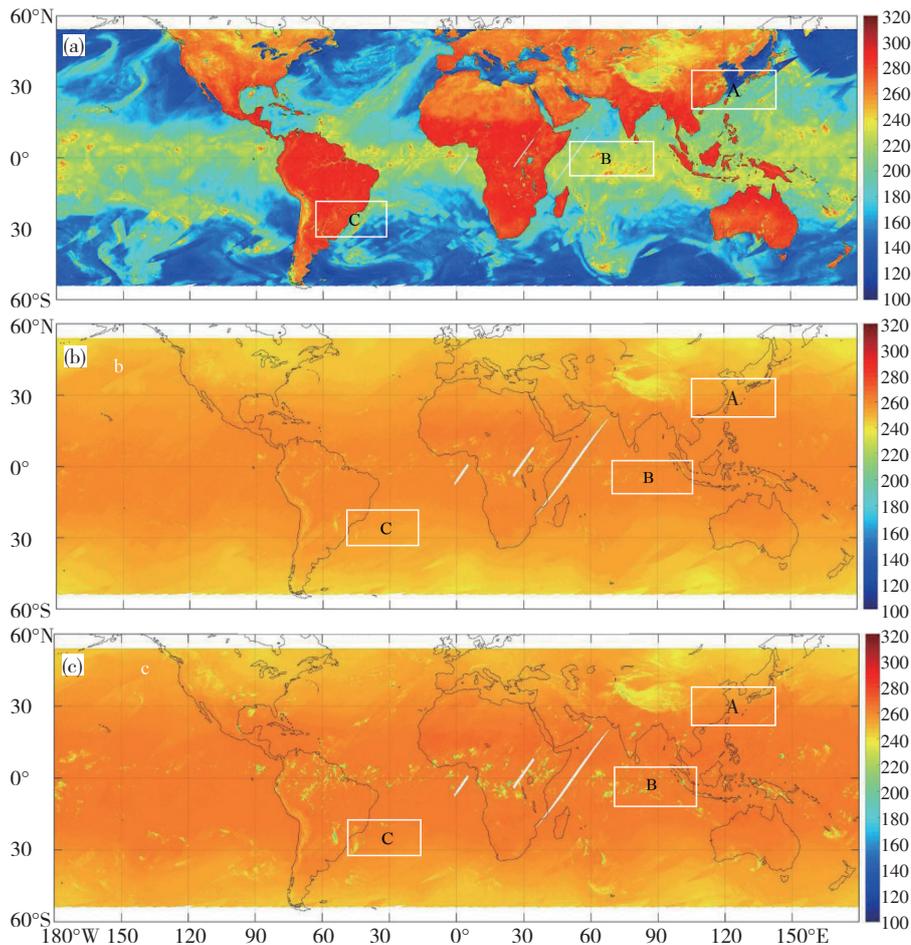


图5 FY-3G 微波成像仪(MWRI-RM) 23.8 GHz 水平极化通道(a)、53.24 GHz 氧气吸收带通道(b)和 118 GHz 氧气吸收线通道(c)一周轨道亮温(单位: K)合成图 (A:内陆水体; B:赤道辐合带; C:南美地区陆地降水系统)

Fig.5 One week orbital brightness temperature (unit: K) composite diagram of (a) 23.8 GHz horizontal polarization channel, (b) 53.24 GHz Oxygen absorption band channel, and (c) 118 GHz Oxygen absorption line channel of Microwave Radiance Imager-Rainfall Measurement (MWRI-RM) of FY-3G (A: inland water body, B: tropical land sea ecotone, C: land precipitation system in South America)

但在氧气吸收通道亮温图像中有显著不同(图5b、c中C区), 118 GHz通道对大气中水凝物的散射信号敏感, 可以更好地提取降水系统上层的水凝物信息, 利用等权重双氧吸收通道的共轭技术可以检测及反演弱降水(郭杨等, 2019)。

### 2.3 中分辨率光谱成像仪降水探测支撑能力

FY-3G降水星装载的降水型中分辨率光谱成像仪(MERSI-RM)保留了原风云三号气象卫星中分辨率光谱成像仪中用于云和降水探测的通道, 略去了海洋水色探测通道, 除用于获取可见光/红外云图外, 还可获取云顶温度、有效粒子半径和云形态学方面的参数, 辅助检测降水云, 进一步改进微波降水反演结果。另外, 由于目前静止轨道风云气象卫星上还没有微波遥感仪器, 使用红外通道来进行降水估计, 因此FY-3G/MERSI-RM还是联系极轨卫星微波降水测量结果和静止轨道卫星红外降水估计结果的桥梁。图6是FY-3G/MERSI-RM在轨实际观测到的降水云图, 可

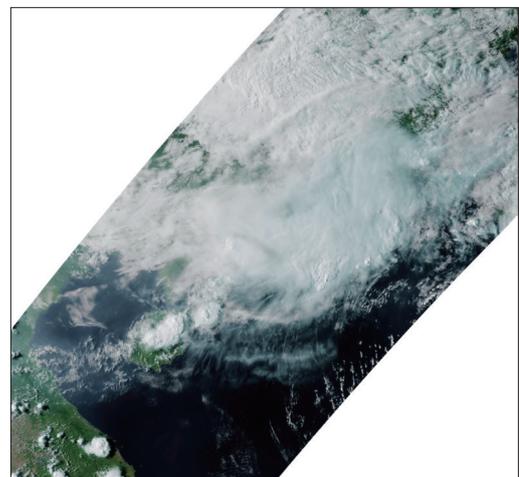


图6 2023年5月7日16时35分FY-3G降水型中分辨率光谱成像仪(MERSI-RM)在轨实际观测的云图

Fig.6 Nephogram observed in orbit from ModErate-Resolution Spectroradiometer Imager-Rainfall Measurement (MERSI-RM) of FY-3G at 16:35 BT May 7 in 2013

以清晰分辨层云和对流云。

## 2.4 风云卫星星座降水探测能力

FY-3G降水星是中国首颗降水测量专用气象卫星,在轨业务运行后,风云三号卫星形成了上午、下午和晨昏与倾斜等四种轨道完整配置的风云低轨气象卫星体系,四条轨道上的风云卫星上均装载了被动微波辐射计。其中在风云三号上午、下午轨道卫星上配置装载了微波成像仪外,还装载了微波温度计和微波湿度计,微波成像仪利用设置在10~89 GHz的微波窗口通道探测降水,微波温、湿度计利用设置在23~183 GHz频段大气氧气和水汽吸收通道线附近的探测通道探测降水;在晨昏轨道上,可以利用微波温、湿度计的探测通道探测降水。FY-3G降水星利用微波成像仪和双频降水测量雷达实现主被动联合反演得到高精度降水探测结果。

主、被动微波降水测量具有很强的互补性,降水测量雷达能得到降水的廓线信息,而微波成像仪可以得到地面降水,降水测量雷达的观测刈幅较窄但精度高,微波成像仪的宽刈幅能够大大提高降水测量的地面覆盖率。同时,降水测量雷达为被动微波反演提供丰富的云、辐射数据库,支撑风云三号气象卫星星座多星装载的被动微波辐射计在统一框架下建立反演模型,得到全球高时效降水产品。此外风云三号系列卫星还装载了带有海反功能的全球导航卫星掩星探测仪GNSS-R,能获得高垂直分辨率的大气温度和湿度廓线以及海面风场信息,支撑降水的综合探测和反演。

在星座体系架构下,降水星主被动结合获取的高精度降水测量结果,可以传递到上午、下午和晨昏轨道卫星的被动微波降水反演模块中,校正提高整个风云三号降水测量星座体系的降水测量精度;如果借助FY-3G降水星上配置装载的MERSI-RM,还可以将降水星的高精度降水测量结果传递给风云静止轨道卫星,优化其红外降水估计结果。在风云三号降水星的支撑下,风云高低轨两个系列的风云降水测量星座整体的降水探测能力和精度将得到大幅提升。

在风云降水测量体系中,专用降水测量卫星的轨道特性决定了降水测量雷达的地域覆盖能力。FY-3降水星关注台风、暴雨等灾害性天气系统中的强降水监测,提供中国区域降水系统三维结构信息,弥补国内地基雷达观测范围受限的弱点。在风云降水测量体系中,其他太阳同步轨道综合业务卫星包括上午、下午和晨昏三条轨道,均能覆盖全球,极轨综合业务平台上装载的微波探测仪轨道刈幅宽度可达2 400 km,微波成像仪轨道刈幅宽度超过1 000 km,而降水测量卫星上装载的微波成像仪刈幅宽度为800 km,降水测

量雷达刈幅宽度300 km,这些系列卫星可通过携带的被动微波辐射计测量降水,同时传递降水测量卫星的高精度降水测量结果,实现风云三号卫星全球降水测量。充分利用低轨气象卫星主被动微波降水测量的高精度探测能力,以及高轨卫星降水探测的高时间分辨能力,可建立支撑中国降水天气气候学应用的高精度风云降水数据集。

## 3 FY-3G降水星应用前景展望

FY-3G降水星科学应用系统包括防灾减灾、应对气候变化、生态监测评估、环境保护、空间天气监测5大领域,含盖了天气预报、数值预报、人工影响天气、地质灾害监测、气候与气候变化、冰冻圈监测、农业生态遥感、陆表生态监测与评估、海洋生态监测、大气环境监测和空间天气监测11个应用方向。FY-3G降水星资料将用于开展华南、江淮暴雨和长江梅雨等中国典型降水天气系统的监测预警研究;台风暴雨监测及发生发展机理研究;北方地区固态降水系统监测预警研究;青藏高原地区降水气候学研究等。FY-3G降水星将面向应用发展云服务平台,针对应用部分的数据资源存储、调度管理,为国家级、省级、行业和社会公众用户提供一体化的风云卫星云端数据共享和应用服务。

在风云三号卫星规划中,2028年之前将有5颗卫星发射,加上目前正在轨的FY-3D/E 2颗卫星,风云三号将有7颗卫星在轨,其中只有1颗超设计寿命,其余6颗均在设计寿命内。这些卫星中有2颗为非太阳同步轨道低倾角降水测量卫星,5颗太阳同步极轨轨道气象卫星,这7颗卫星将组成风云三号降水测量星座。按照2颗降水测量卫星伴飞的方式来考虑,整个风云三号降水测量星座的这些卫星1 d内过境的交点地方时除下午到傍晚时段外,其他时段可得到优于3 h的降水探测结果,如果再融合静止轨道红外降水估计结果,可以得到0.5 h时间分辨率的降水数据。按卫星计划目前美国GPM降水测量星座中只含有5颗卫星,如果后续欧美没有新的降水测量卫星发射计划,未来2028年前后风云三号降水测量星座的降水探测能力将超过GPM计划,届时将为全球降水测量提供风云解决方案。

风云后续卫星计划包括风云五号气象卫星、风云四号微波星和风云六号卫星。其中风云五号气象卫星将继续保持上下午、晨昏和低倾角降水测量星座体系,新一代降水测量雷达将在PMR的基础上,增加多极化探测能力,同时发展多普勒测量技术获取降水系统内部流场结构信息。在风云五号规划中,还将利用

极轨核心业务平台和降水测量卫星平台上装载的5~183 GHz宽刈幅多谱段高分辨率微波成像仪,获取全球降水分布信息;利用微波高光谱大气探测仪获取大气降水参数;利用亚毫米波冰云探测仪获取大气冰云信息及冰水路径参数;利用云雷达获取降水前期物云粒子的特性参数;利用偏振成像仪获取气溶胶及云参数;利用红外高光谱大气探测仪获取大气不稳定信息;借助高分辨率气象综合孔径雷达获取暴雨气象灾害监测信息,这些新的探测手段将进一步提高风云卫星气象防灾减灾能力。

新一代静止轨道风云卫星包括风云四号静止轨道微波星和风云六号卫星,静止轨道微波星将获取高时间分辨率的中国及周边区域台风暴雨等灾害性天气系统内部结构和地面雨率的探测结果;同时继续利用静止轨道光学成像仪,获取高时间分辨率降水估计结果。

总之,在后续风云卫星计划中,将通过高低轨互联和协同观测,充分发挥低轨的高空间分辨率和高轨的高时间分辨率的优势,形成台风、暴雨等灾害性天气系统从初生、发生发展演变到消亡全生命周期,以及灾后地面灾情监测的全链条星载探测。而主动云雨测量、微波高光谱、亚毫米波/太赫兹探测、短波红外偏振测量等新技术将是支撑后续风云卫星实现高质量降水探测的核心技术。未来风云卫星将通过不断提升星载降水探测能力,促进中国降水探测及预报准确性的提高,加深对能量水循环系统的认识,进而增强中国应对全球极端天气和气候变化的能力。

## 参考文献(References):

- 陈洪滨,尹红刚,何文英.2020.星载主动微波遥感云和降水技术与应用[M].北京:科学出版社. Chen H B, Yin H G, He W Y. 2020. Spaceborne active microwave remote sensing of cloud and precipitation technology and applications [M]. Beijing:Science Press (in Chinese)
- 傅云飞,罗晶,罗双,等.2022. GPM卫星 DPR和GMI探测的2018年5月重庆超级单体云团降水结构特征分析[J].暴雨灾害,41(1):1-14. Fu Y F, Luo J, Luo S, et al. 2022. Analysis of precipitation structure characteristics of Chongqing supercell cloud clusters detected by GPM satellite DPR and GMI in May 2018 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(1): 1-14 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.001
- 谷松岩,卢乃锰,吴琼,等.2022. FY-3气象卫星降水探测能力分析与展望[J].海洋气象学报,42(2):1-10. Gu S Y, Lu N M, Wu Q, et al. 2022. Analysis and prospect of precipitation detection ability of FY 3 Meteorological Satellite [J]. *Journal of Marine Meteorology*,42(2):1-10 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.001
- 郭杨,卢乃锰,白文广,等.2019.星载微波双氧探测通道等权重共轭的降水检测方法及其系统(ZL201911377080.1) [S]. Guo Y, Lu N M, Bai W G, et al. 2019. Precipitation detection method and system with equal weight conjugation for spaceborne microwave oxygen detection channel (ZL201911377080.1) [S]. (in Chinese)
- 韩芙蓉,鹿翔,吴天怡,等.2023.多卫星融合降水产品对2015—2020年登陆浙江台风降水的监测能力评估[J].暴雨灾害,42(1):57-66. Han F R, Lu X, Wu T Y, et al. 2023. Evaluation of monitoring capability of multi satellite integrated precipitation products on precipitation of typhoons landing in Zhejiang from 2015 to 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(1):57-66 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-015
- 李函璐,孙礼璐,杨柳,等.2022.基于TRMM PR探测资料的青藏高原东坡降水结构特征分析[J].暴雨灾害,41(4):384-395. Li H L, Sun L L, Yang L, et al. 2022. Analysis of precipitation structure characteristics on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau based on TRMM PR detection data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(4):384-395 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.003
- 王立羽,傅云飞.2022.基于GPM与ERA5数据的北太平洋冬季风暴路径降水个例分析[J].暴雨灾害,41(5):525-535. Wang L Y, Fu Y F. 2022. Case study on precipitation of winter storm paths in the North Pacific based on GPM and ERA5 data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(5): 525-535 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2020-256
- 吴琼,商建,仰美霖,等.2013a.基于滴谱分布的机载雷达波束匹配情况研究[J].气象学报,71(3):547-554. Wu Q, Shang J, Yang M L, et al. 2013a. Research on airborne radar beam matching based on droplet spectral distribution [J]. *Journal of Meteorology*,71(3):547-554 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.046
- 吴琼,杨虎,商建,等.2013b.星载双频测雨雷达航空校飞试验降水反演分析[J].气象学报,71(1):159-166. Wu Q, Yang H, Shang J, et al. 2013b. Precipitation inversion analysis of spaceborne dual frequency rain radar flight test [J]. *Journal of Meteorology*,71(1):159-166 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.013
- 杨柳,袁俊鹏,孙囡,等.2022.基于星载测雨雷达探测资料的青藏高原东南坡降水个例分析[J].暴雨灾害,41(3):276-289. Yang L, Yuan J P, Sun N, et al. 2022. Case study of precipitation on the southeast slope of the Qinghai Tibet Plateau based on spaceborne rain radar detection data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(3):276-289 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.004
- 尹红刚,吴琼,谷松岩,等.2016.风云三号(03)批降水测量卫星探测能力及应用[J].气象科技进展,6(3):55-62. Yin H G, Wu Q, Gu S Y, et al. 2016. The detection capability and application of the FY3 (03) Batch Precipitation Measurement Satellite [J]. *Progress in Meteorological Science and Technology*,6(3):55-62 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.007
- Draper D W, Newell D A, Wentz F J, et al. 2015. The global precipitation measurement (GPM) microwave imager (GMI):Instrument overview and early on-orbit performance [J]. *Remote Sensing*,8(7):3452-3462
- Kummerow C J, Simpson O, Thiele W, et al. 1998. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,39:1965-1982
- Nigel A. 2019. EPS-SG MicroWave Sounder (MWS) science plan prepared by the MWS science advisory group [EB]. <https://www.eumetsat.int/media/43204>

(责任编辑 唐永兰)