

**引用格式:** Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, *et al.* An Overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission and It's Latest Development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 607-615. [唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 607-615.] doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0607

# 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述

唐国强<sup>1</sup>, 万 玮<sup>1,2</sup>, 曾子悦<sup>1</sup>, 郭晓林<sup>1</sup>, 李 娜<sup>3</sup>, 龙 笛<sup>1,2</sup>, 洪 阳<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学水利系, 北京 100084;

2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** GPM 降水计划是继 TRMM 之后新一代全球卫星降水产品, 其核心观测平台已于 2014 年 2 月 28 日发射, 卫星群目前由 10 颗卫星组成, 未来还有可能继续扩充。但目前国内还缺少专门介绍 GPM 计划及其产品的最新文章。新一代 GPM 降水产品分为 4 级, 与以往的卫星降水产品相比具有更高的精度、更大的覆盖范围、更高时空分辨率, 能够提供全球范围基于微波的 3 h 以内以及基于微波红外 IMERG 算法的 30 min 的雨雪数据产品, 有利于促进水文、气象、农业和灾害等学科的研究和应用。与着重观测热带亚热带地区降水的 TRMM 相比, GPM 能够更加精确地捕捉微量降水( $<0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和固态降水, 这两种类型降水的观测对中高纬度地区和高原地区具有重要意义。对 GPM 计划的核心观测平台、算法产品、地面验证和应用前景等进行了阐述, 有利于 GPM 产品在国内的应用和推广。

**关键词:** GPM; TRMM; 降水观测; 水文气象

**中图分类号:** P 412.27      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2015)04-0607-09

## 1 引言

降水的时空分布对淡水资源供给、生态系统维持有着重要且直接的影响, 与台风(飓风)、洪水、干旱和泥石流等灾害也存在密切联系。除对地球水圈存在重要影响外, 降水在全球能量平衡中也扮演着重要角色, 降水通过潜热交换影响云层、水汽及大气, 通过稀释海水盐度影响大洋环流, 通过调节积雪覆盖影响地面反射率<sup>[1]</sup>。因此, 准确的降水观测影响着人们对全球水圈以及能量平衡系统的认识, 对于社会经济、科学研究等均具有重要意义<sup>[2]</sup>。

传统的地面直接观测降水方式主要有雨量计和雷达两种, 但是它们在进行降水观测方面存在诸多

不足。雨量计降水能够提供高精度的地面点观测降水, 但是受到站网密度及其空间分布的影响, 难以准确捕捉降水的时空分布<sup>[3]</sup>; 而雷达降水也受到电子信号以及运行环境等多种误差来源的影响, 如地形遮挡、雷达射线抬升和 Z-R 关系的不确定性等, 在地形复杂地区具有较大的不确定性。因而从太空进行卫星降水观测是系统了解全球降水情况及其变化的唯一有效手段<sup>[4-5]</sup>。

第一颗气象卫星于 1960 年发射, 此后大量传感器被开发和应用用于大气观测。这些传感器主要分为两类: 可见光/红外(VIS/IR)传感器和微波(MW)传感器, 前者由地球同步轨道(GEO)卫星和近地轨道(LEO)卫星搭载, 后者目前只由近地轨道(LEO)

收稿日期: 2014-12-25; 修订日期: 2015-05-17

**基金项目:** NSFC 青藏高原地—气耦合系统变化及其全球气候效应重大研究计划重点项目“青藏高原地—空多源降水和总储水量反演同化及其在区域水循环研究中的应用”(91437214), 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-A09), 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放课题(SKHL1310)。

**作者简介:** 唐国强(1991—), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 15201514761@163.com。

**通讯作者:** 洪 阳(1973—), 男, 重庆人, 教授, 主要从事遥感水文与水文气象等研究。E-mail: hongyang@tsinghua.edu.cn。

卫星搭载。近 30 a 来,研究者们逐渐将两种传感器的数据融合以获取更加精准的降水信息。表 1 汇总了目前可用于气候、天气、水文研究的全球卫星降水产品,包括其名称、发布机构/国家、时空尺度以及提供数据的时期。

本文将首先简要回顾 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)计划,然后主要讲述其后续 GPM(Global Precipitation Measurement)全球卫星降水计划,GPM 能够提供全球范围基于微波的 3 h 以内以及基于微波红外 IMERG 算法的半小时雨雪数据产品,对于水文、气象、农业和灾害等学科研究具有重要意义。

## 2 TRMM 卫星降水观测计划

TRMM 卫星由 NASA(National Aeronautics

and Space Administration)和 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)合作开发设计,主要用于监测和研究热带地区降水。卫星于 1997 年 11 月 28 日在日本发射,TRMM 卫星属于近地轨道卫星,倾角约为 35°,覆盖范围为 35°N~35°S。它是第一颗专门用于观测热带、亚热带降水的气象卫星,搭载了微波成像仪 TMI、降雨雷达 PR、可见/红外辐射仪 VIRS、雷电探测器 LIS、地球辐射能量探测器 CERES 等传感器<sup>[6]</sup>。在 TRMM 卫星搭载的设备中,降雨雷达具有开创性的设计,它由日本宇宙开发事业团设计建造,能够提供暴雨的三维结构,对降水的精确估计具有重要的提升作用。

表 2 所示,TRMM 卫星提供的产品分为两类:卫星标准产品和地面验证(Ground-validation,GV)产品,其中标准产品主要分为 4 级<sup>[7]</sup>。

表 1 全球卫星降水产品汇总<sup>[5]</sup>  
Table 1 Summary of global satellite precipitation products

产品名称	机构/国家	时空尺度	数据时期
GPCP <sup>[8]</sup>	NASA/USA	2.5°/月	1979~
CMAP <sup>[9]</sup>	NOAA/USA	2.5°/5 天	1979~
GPCP IDD <sup>[10]</sup>	NASA/USA	1°/天	1998~
TPMA <sup>[11]</sup>	NASA-GSFC/USA	25 km/3 小时	1998~
CMORPH <sup>[12]</sup>	NOAA-Climate Prediction Center/USA	25 km/3 小时	2002~
PERSIANN <sup>[13]</sup>	University of Arizona/USA	25 km/6 小时	2002~
NRL-Blend <sup>[14]</sup>	Naval Research Lab/USA	10 km/3 小时	2003~
GSMaP <sup>[15]</sup>	JAXA/Japan	10 km/小时	2005~
UBham <sup>[16]</sup>	University of Birmingham/U. K.	10 km/小时	2002~
PERSIANN-CCS <sup>[17]</sup>	University of California Irvine/USA	4 km/半小时	2006~
PERSIANN-CDR <sup>[18]</sup>	University of California Irvine/USA	25 km/天	1983~

表 2 TRMM 标准产品分类及描述<sup>[7]</sup>  
Table 2 TRMM standard products classification and description

产品级别	描述
1 级	校正处理原始资料生成 HDF 格式数据,包含标定后的 VIRS 反射率、TMI 亮温、PR 的回波功率和反射率数据
2 级	基于 1 级产品计算出大气状况数据,包含地球物理参数和 TMI 降水廓线(2A12)、PR 地表横截面(2A21)、降水高度和亮带高度(2A23)、PR 降水廓线(2A25)以及 TMI 和 PR 联合反演的降水廓线(2B31)
3 级	对 2 级产品中的降水强度、三维反射率进行处理后生成的 5 天和 30 天的降水图和三维降水结构
4 级	资料分析产品或 TRMM 资料与其他卫星数据联合反演得到的产物

基于 TRMM 卫星的 TMPA(TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis)以多个现代卫星降水传感器以及地面雨量计网络的观测为基础,计划产生自 TRMM 以来“最好”的降水产品<sup>[11]</sup>。TMPA 的降水估计通过 4 个步骤产生:①校准及融合微波(MW)降水估计;②使用校准过的微波(MW)降水

生成可见光/红外(IR)降水估计;③融合 MW 和 IR 降水估计;④融入雨量计降水数据<sup>[5]</sup>。TMPA 为研究者提供两种标准降水卫星产品:准实时的 3B42RT 以及非实时后处理的 3B42V7,能够提供 1998 年至今全球 50°N~50°S 的卫星降水数据,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.25°。卫星降水产

品在气候和水文研究中得到了大量应用<sup>[11,19-22]</sup>。Hong 和 Adler<sup>[23]</sup>在 2008 年使用基于 TRMM 的多卫星实时降水驱动简化版全球水文模型(GHM),实现了全球洪水实时计算。2010 年,全球水文模型的新版本 CREST(Coupled Routing and Excess Stor-

age)分布式水文模型由俄克拉荷马大学(<http://hydro.ou.edu>)和 NASA SERVIR 项目组(<http://www.servir.net>)成功开发<sup>[24]</sup>,并且实现了基于 TMPA 卫星降水全球实时洪水预报,图 1 为近期全球径流模拟及洪水预报系统的一个案例。

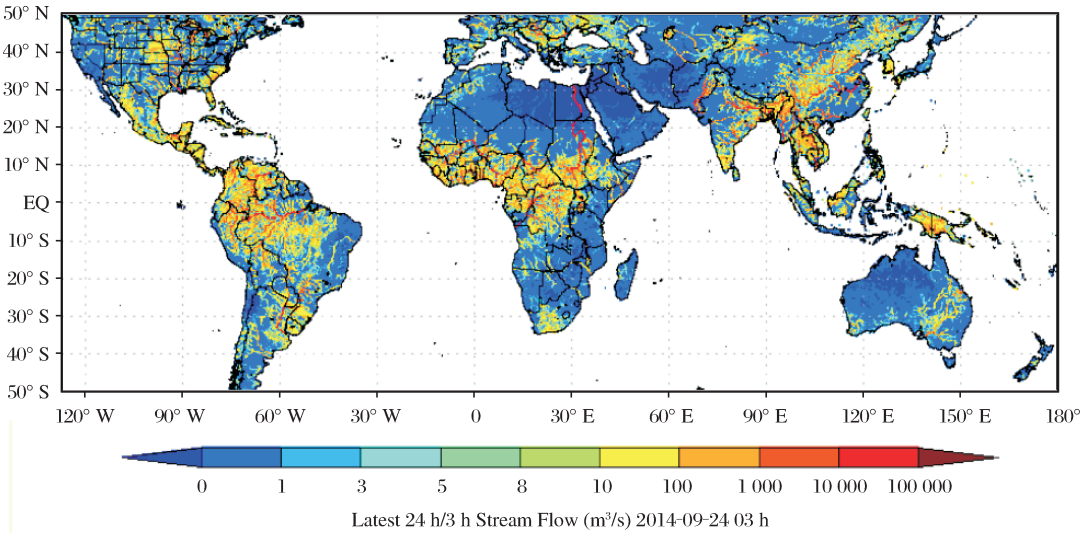


图 1 TRMM 实时降水驱动分布式水文模型的全球洪水模拟系统示范(<http://hydrosky.org>)  
Fig. 1 Near Realtime Global Hydrological Simulation and Flood Monitoring Demonstration  
System based on TRMM near realtime precipitation using a distributed model

TRMM 作为 GPM 的先驱已经取得了超出预期的成果,然而它在空间覆盖率和冻雨观测灵敏度方面还存在固有局限,由于燃料即将耗尽,TRMM 卫星轨道正在下降,已于 2015 年 4 月停止运行。GPM 不但将延续 TRMM 的星基降水传统,还将更大程度上提高其时空分辨率、观测精度和准确性,并真正实现全球降水(含雨雪)产品。

3 GPM 计划综述

全球降水观测(GPM)是 TRMM 的后续卫星降水计划,能够提供全球范围基于微波的 3 h 以内以及基于微波红外的半小时的雨雪数据产品,范围延伸至南北极圈。GPM 扩展了 TRMM 传感载荷,提升了降水观测能力。GPMCO(GPM Core Observatory)搭载的双频雷达可探最小回波强度较低(Ku 波段),并且可以采用高敏感度模式交错采样(Ka 波段);同时 GPMCO 的微波辐射计与 TRMM 卫星相比多出 4 个高频段,增强了对微量降水及固态降水的观测能力。因而与重点观测热带、亚热带中大型降水的 TRMM 相比,GPM 能够更加精确地捕捉微量降水( $<0.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )和固态降水,这两种降水类型是中高纬度地区降水的重要组成部分,GPM 观

测成果对此地区的研究具有重要意义。

GPM 计划主要由 4 部分组成。第一部分是卫星群测量系统的硬件组成部分;第二部分是数据信息系统,即 GPM 降水处理系统(PPS,Precipitation Processing System),其功能由 NASA、JAXA、ESA 承担,主体功能由 NASA 戈达德太空飞行中心(GSFC)负责。PPS 的主要职责有:①获取 0 级、1 级传感器数据;②产生 1 级校准/地理定位辐射计亮温数据;③将 1 级数据处理成为稳定一致的 2 级、3 级标准降水产品;④传播降水产品;⑤将所有获得及产生的数据产品通过合适的方式储存。第三部分是国际 GPM 地面验证(GV,Ground Validation)计划,它由全世界 GV 测量站点网络及其相关的科技支撑机构组成。第四部分是 Smith 等<sup>[25]</sup>认为的整个计划最有价值的部分,即所有项目参与者,例如科学家、工程师和办公人员等。

沈艳等<sup>[26]</sup>研究评估了 6 种常用卫星降水产品在中国地区的表现,结果表明各类产品虽然都能够捕捉整体的降水时空分布,但对于寒冷季节、干旱半干旱地区的降水观测精度有待提高,对于梅雨早高峰的估计也仍需加强。GPM 依靠其核心平台更加

强大的观测能力以及更加完善的卫星观测系统,能够提升对各类降水,如寒冷季节降水以及高原地区的观测精度。期待更多研究针对 GPM 降水产品在中国地区的表现进行深入的分析 and 验证。

3.1 GPM 卫星群

GPM 卫星群包含了 NASA 和 JAXA 已有卫星及与两者有双边协议合作单位的卫星(图 2),实现了全球覆盖。除了 NASA 与 JAXA 发射的 GPM 核心观测平台和其他卫星,还包含法国 CNES(Centre National d’Etudes Spatiales)、印度 ISRO(Indian Space Research Organisation)、欧洲 EUMET-

SAT(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)、美国 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)以及 DOD(Department of Defense)的卫星。所有卫星在执行各自的任务之外,会将它们微波传感器获得的数据提供给 GPM 以生成全球降水产品,中国的 FY-3 辐射计和俄罗斯 MTVZA 辐射计将来也可能为 GPM 提供微波数据<sup>[4]</sup>。

GPM 卫星群包含的辐射计有锥扫和交叉跟踪扫描两种方式,频率范围与 GPMCO 单颗卫星相比有所扩大(6~183 GHz)。

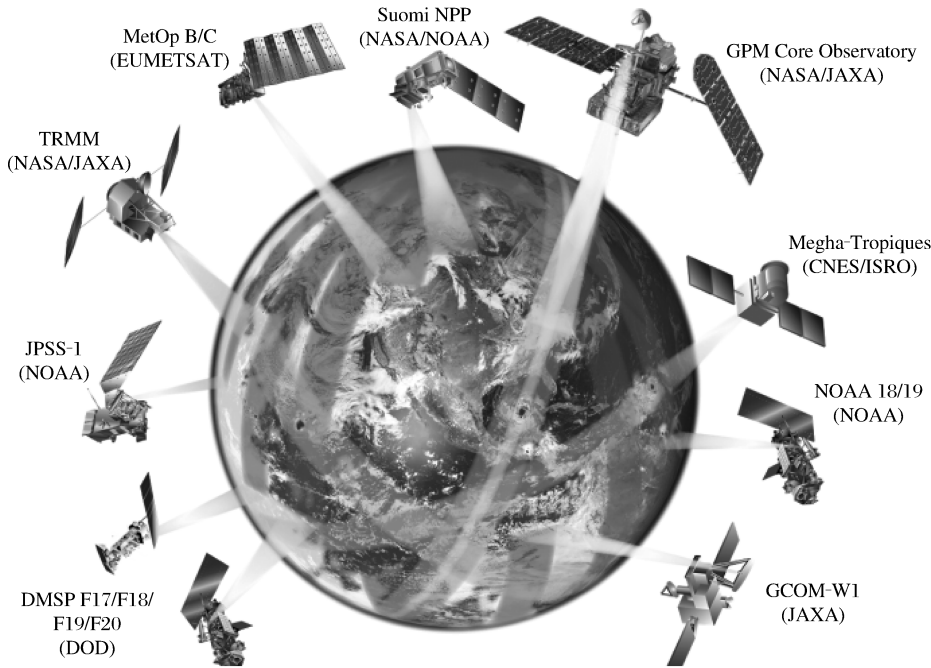


图 2 GPM 卫星群 (<http://pmm.nasa.gov/GPM>)

Fig. 2 GPM constellation composition

3.2 GPM 核心观测平台

GPM 核心观测平台(GPM Core Observatory, GPMCO)是 GPM 计划的核心部分,它于 2014 年 2 月 28 日成功发射,运行高度为 407 km,轨道为圆形,非太阳同步,倾角 65°,运行速率为 7 km/s,轨道周期为 93 min,一天绕地球约 16 圈,设计年限 3 a,工作年限 5 a。GPMCO 搭载了全球首个星载双频卫星雷达(Dual-frequency Precipitation Radar),即 DPR,工作频段分别为 Ku 和 Ka 段(分别为 13 和 35 GHz),同时 GPM 也搭载了一个多波段(10~183 GHz)锥扫微波成像仪,即 GMI(GPM Microwave Imager)<sup>[4]</sup>。相较于其前身 TRMM 卫星,GPMCO 搭载的设备更加先进、覆盖范围更加广泛。GPMCO 能够观测热带海洋形成的风暴,并追踪风

暴向中高纬度地区运动的轨迹,有利于研究者观测风暴整个生命周期的结构及变化情况。同时通过 DPR 和 GMI 的观测能够量化降水粒子的微观物理特性,从而建立一个独特的观测数据库,在此基础上实现降水反演算法的改进。对于不同的环境条件,这个数据库可以作为共同参照,实现不同微波辐射计观测结果的统一,建立起太空降水观测的新标准,这种方法的意义已经不局限于 GPMCO 的生命周期,为以后卫星观测降水提供了新思路和新方法。图 3 为 GPMCO 搭载的 DPR、GMI 扫描模式以及幅宽。

3.2.1 搭载主要设备:GMI

地球上的所有物体无时无刻都在发散微波能量,能量的大小由物体的温度及物理特性决定,云层

中的降水及降雪也都发散出自己的能量,通过对这些能量的大小和频段进行对比分析,能够区分降水和降雪、计算降水量以及降水强度。

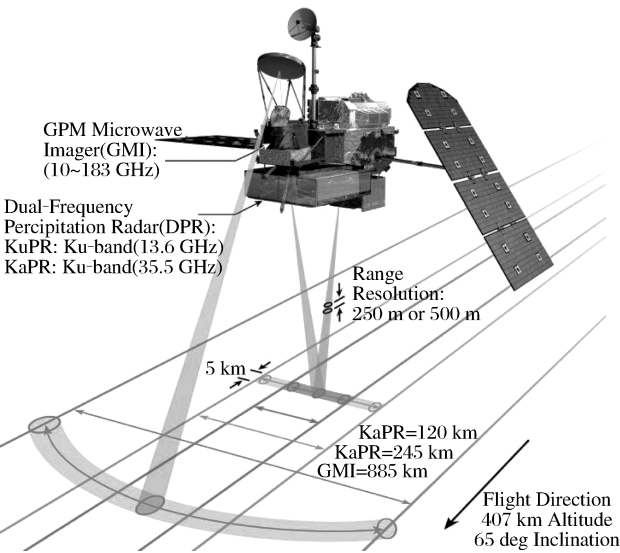


图 3 DPR 和 GMI 扫描模式及宽度<sup>[4]</sup>

Fig. 3 A schematic of the scanning patterns and swaths of the DPR and GMI

GMI 由美国波尔航太科技公司为 NASA 戈达德宇宙飞行中心开发建造,它具有 13 个频段,能够观测所有云层内的降水,包括微量降水以及降雪。GMI 低频段(10~89 GHz)与 TRMM 搭载的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)类似,能够观测中大型降水,而 GMI 的高频段(166~183 GHz)能够观测到中小型降水,图 4 表示 GMI 13 个频段最适合观测的降水种类,从左到右依次是 10. 65 V&H、18. 7 V&H、23 V、37 V&H、89. 0 V&H、164 V、165 H、183. 31±3V、183. 31±7 V 频段,5 个低频段适合观测各类液态降水,4 个中频段能够捕捉液态、固态混合降水,4 个高频段适合观测固态降水。

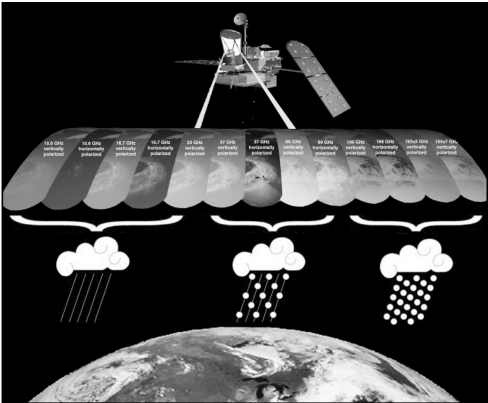


图 4 GMI 各频段及敏感观测降水

Fig. 4 GMI channels and sensitive types of precipitation

GMI 主反射器以每分钟 32 转的速率转动,收集以航天器地面轨迹为中心的 140°扇形上的微波辐射测量数据,地表扫描幅宽 885 km(图 3),覆盖了 DPR Ka-Ku 幅宽,但是由于航天器运动,GMI 与雷达的观测相比滞后 67 s。GMI 的天线直径为 1.2 m,运行高度为 407 km,相比于 TMI 和 GPM 卫星群其他卫星携带的辐射计,GMI 能够获得更高的空间分辨率。表 3 为 GMI 与 TMI 一些参数的对比,可以看出相较于其前身,GMI 在技术方面有了很大的提升。

表 3 GMI 与 TMI 参数对比

Table 3 Comparison of parameters for GMI and TMI			
传感器	频段数	频率范围/GHz	扫描宽度/km
GMI (GPM)	13	10~183	885
TMI (TRMM)	9	10~85.5	758.5

3. 2. 2 搭载主要设备:DPR

DPR 为全球首个星载双频降水雷达,由日本 JAXA 和 NICT(National Institute of Communication Technology)联合设计,NEC 东芝航天系统公司建造,能够测量降水的三维结构,包含了 Ka 波段雷达(KaPR)和 Ku 波段雷达(KuPR),运行频率分别为 35. 5 和 13. 6 GHz。从图 1 中可以看出,KaPR 扫描幅宽为 125 km,KuPR 扫描幅宽为 245 km,而垂直于幅宽方向宽度均为 5 km,竖直向空间分辨率为 250 m,采样间隔为 125 m,探测到的最小回波强度不高于 18 dBZ。而当 KaPR 使用高敏感度模式时(在交错采样时期采用),探测的最小回波强度不高于 12 dBZ,竖直空间分辨率为 500 m。

Ku 波段降水雷达频率与 TRMM PR 相近,但是由于技术上的改进 KuPR 能够达到更高的精度和敏感度,降水探测的最小阈值达到了 0. 5 mm/h,而当 KaPR 在高敏感度模式下运行,降水探测的最小阈值进一步下降,达到 0. 2 mm/h。除了精度和敏感度上的提升,DPR 与 TRMM PR 相比最大的提升是能够对 KaPR 和 KuPR 扫描重合部分的 15 mm/h 以下的降水,提供降水粒度分布(PSD, Particle Size Distribution)的定量估计。PSD 的获取具有重要意义,其大小特征、计数浓度能够用来完善降水反演算法的先验假设。

3. 3 算法及产品

GPM 能够提供 4 种级别的数据,1 级数据包含 DPR 雷达功率、GMI 亮度温度等;2 级数据包含地理定位物探数据(如降水)、瞬时视场(IFOV) DPR

反射率;3 级数据包含网格化时空分布物探数据(如潜热);4 级数据包含遥感和模型融合数据<sup>[4]</sup>。由 GPM 核心观测平台和瞬时视场的星群卫星测量进行的降水反演中,包含有 GPM 的 2 级 DPR 算法、

DPR 与 GMI 融合算法以及雷达增强辐射计算法。另外也有单独的算法融合多卫星产品以及估计潜热值。通过这些不同的降水反演算法得到的 GPM 产品分为 4 级,表 4 是对各级别产品的介绍。

表 4 GPM 的各级别产品介绍  
Table 4 Introduction to various levels of GPM products

产品级别			描述	覆盖范围
1B 级 GMI	1B 级 GMI	延迟时间 1 h	地理定位的亮温和交互校准的亮温	Swath,IFOV(NASA 产品)
1B 级 DPR			地理定位、校准的雷达功率	Swath,IFOV(JAXA 产品)
1C 级多卫星辐射计			交互校准的亮温	Swath,IFOV(NASA 产品)
2 级 GMI	延迟时间 1 h		雷达强化的降水反演	Swath,IFOV
2 级多卫星辐射计			1C 级的雷达增强降水反演	Swath,IFOV
2 级 DPR	延迟时间 3 h		反射率,sigma 0,特性描述,PSD,垂直结构分布的降水	Swath,IFOV(Ka,Ku 或 Ka/Ku 融合波段)
2 级联合 GMI/DPR	延迟时间 3 h		降水	Swath,IFOV(起初在 DPR Ku 幅宽之后在 GMI 幅宽)
3 级潜热(GMI,DPR 及其联合)			潜热及其相关参数	0.25°×0.25°月网格数据
3 级仪器累积量			GMI、多卫星辐射计,与 DPR 联合	0.25°×0.25°月网格数据
3 级融合产品			融合 GMI、多卫星辐射计和 IR	0.1°×0.1°30 分钟网格数据
4 级产品			模型同化的降水预报和分析	模型的时空范围

其中,DPR 相比于 TRMM 单频雷达和地面雷达有所改进<sup>[27]</sup>,DPR 算法能够提供像素级别(水平向 5 km,垂直向 125 m)的瞬时面降雨和垂直水汽廓线及其在网格上的时空累积量。DPR 与 GMI 融合算法不仅能实现上述目标,而且有助于构造几乎全球范围的亮温微波辐射率与水汽廓线的先验关系数据库。雷达增强辐射计反演算法中 GPM 卫星星群采用卫星间辐射计交互校准和 2 级传感器反演,能显著提高单独微波仪器对于降水估计的精度和一致性。另外,GPM 还采用多源卫星融合算法和潜热算法,由这些算法提取的产品在表 4 中均有描述,其中对于 3 级潜热产品,GPM 还将继续提高时间分辨率,提供 3 h 的网格数据。以上的 GPM 数据将逐步对公众免费开放。目前 0~3 级的部分产品已经可以下载,包括全分辨率的未经处理的传感器观测数据、时间参考数据、地理坐标参数(例如平台星历)、辐射校正和几何校正系数等,其中 0 级产品为原始观测数据。数据格式为 HDF5 和 OPeNDAP。3 级产品 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM),能够提供全球 0.1°,30 min 的降水产品,数据时间跨度为从 2014 年 3 月中旬至今,对于水文、气象、灾害等研究具有重要意义。GPM 其他产品的特征及获取可以查询网站 <http://pmm.nasa.gov>。

图 5 为 2014 年 3 月 10 日日本海沿岸一次热带外气旋内部的 3D 图像,这是 GPMCO 搭载的 DPR 观测数据的第一张可视化三维结构图。图像显示,2014 年 3 月 10 日,一个垂直截面约 7 km 的热带气旋穿过日本海沿岸。DPR 幅宽为 245 km 扫描路径嵌套在 GMI 扫描路径的中心,图中红色区域表示强降水,黄色和蓝色表示较弱的降水。

### 3.4 地面验证系统

GPM 提供的全球降水卫星产品精度需要结合地面观测试验进行验证。传统的卫星降水产品验证多以地基雷达或雨量计的测量数据作为参考值。由 TRMM 产品验证经验可知,采用传统方法能够在一定程度上满足验证需求。但是,一方面,地面测量数据本身具有不确定性;另一方面,对于基于物理机理反演的卫星降水剖面,仅依靠地表雨量测量数据,尚不能满足大范围、立体的卫星产品验证需求。为此,GPM 降水产品验证采用统计验证、机理验证、融合验证 3 个层次的验证策略,为产品提供更深入、精准的验证和精度改进方案。

(1)基于全球地面测量站网的直接统计验证:GPM 降水产品的验证,需结合全球不同纬度、不同气候特征区域的地基雷达、雨量计测量数据。NASA 降水科学组目前已组织包括美国和其他 14



个国家,形成 GPM 降水产品联合验证团队,在现有卫星降水产品进行验证的同时,指导新型降水产品的研发。另外,NASA 也已同欧洲水文水资源管理机构 H-SAF 合作,联合开展欧洲地区的 GPM 及其他卫星降水产品验证工作。

(2)基于地基、空基观测试验的降水反演机理验证:NASA 已组织长期观测和加密观测试验,用于对降水剖面的物理特性及反演机理进行验证。首次观测试验 MC3E(the Mid-latitude Continental Convective Clouds Experiment)于 2011 年 4~6 月在美国俄克拉荷马州东北部开展,试验采集了包括 Ka-Ku 波段雷达、多频率辐射计(10~183 GHz)、以及多类微波物理观测参数,用于验证 DPR 反演算法的精度。随后,NASA 与加拿大合作于 2012 年 1~2 月开展了 GCPEX(the GPM Cold-season Precipitation Experiment),对 GPM 降雪反演算法进行验证。

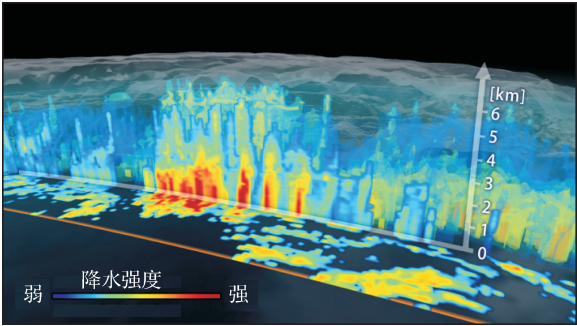


图 5 日本海沿岸热带气旋内部 3D 图<sup>①</sup>  
Fig. 5 3D view inside an extra-tropical cyclone observed off the coast of Japan

(3)以水文气象应用为导向的融合验证:主要用于验证卫星降水产品在水文、陆面模型中的可用性,包括水文应用中卫星降水产品的时空尺度需求、产品的不确定性以及由此带来的水文预报误差等。首次融合水文应用的验证试验 IFloodS(Iowa Flood Studies experiment)已于 2013 年 4~7 月在美国爱荷华州东北部开展。目前 NASA 和 NOAA 正在组织计划于 2014~2016 年开展另外两项试验,分别为 IPHEX(the Integrated Precipitation and Hydrology Experiment)和 OLYMPEX(Southeast Program and the Olympic Peninsula Experiment),用于验证复杂地形下 GPM 降水产品的水文过程应用。

3.5 应用前景

新一代 GPM 降水产品对水文、气象和农业等科学的发展具有重要意义,对科学研究、社会应用具

有深远影响,主要包括以下 5 点:  
(1)增强对极端天气事件,如台风的预报能力。卫星使得人们能够观测风暴降水整个生命周期的运动、演变特征,尤其是在难以进行地基观测的海洋上形成的风暴。TRMM 卫星在这方面已经取得了良好的成果,GPM 则在 TRMM 的基础上进一步强化了观测能力。微波仪器相比于红外/可见光传感器的一大优势就是其穿透云层反演降水结构的能力,这种特性已经被很多机构应用。GMI 能够提供 GPM 计划卫星群中分辨率最高的观测成果,对提升台风的追踪和预报能力、制定决策、减灾防损都具有重要意义。

(2)加强气象、气候预报能力。为了了解未来气象、气候的变化情况,研究者需要使用各种复杂的模型进行模拟预报,GPM 能够提供对降水微观物理特性的观测成果,有利于地球系统分析和建模。另外许多研究表明,降水信息与全球及区域预报系统的数据同化能够提高大气分析和短期预报能力<sup>[28-30]</sup>。通过提供更精确、更频繁的准实时观测,GPM 能够促进数值天气技术的发展。

(3)提升对洪水、干旱和泥石流等灾害的预报能力。GPM 能够提供大量 3 h 以内的全球降水产品,满足水文气象应用要求的最小时间间隔<sup>[31]</sup>。降水水文模型最重要的输入,以往基于模型的气象、灾害预报较多的受制于降水资料的影响,GPM 降水产品相比以往卫星降水产品精度更高,能够满足水文模型的高要求,增强了对于洪水、泥石流等灾害的预测和评估能力,尤其是在地面观测站网较为稀疏的发展中国家。

(4)提高农作物生产的预报和指导能力。水资源是农业生产的命脉,在准确预报降水的时间、空间和数量等特征的基础上,才能够预测粮食产量,掌握与农业息息相关的淡水资源情况。GPM 提供的卫星降水产品可以驱动农业方面的预测模型,增强农作物生产的预报和指导能力。

(5)提升对淡水资源的监控能力。淡水资源是人类活动的必需品,包括饮用、灌溉、卫生、畜牧和矿业等,而监控淡水资源则需要准确的降水观测。GPM 提供的新一代卫星降水产品能够满足更好地理解 and 预测淡水资源供给变化的需求。

4 结 语

GPM 是基于 TRMM 的新一代全球卫星降水观测计划,它能够统一其卫星群框架内各卫星的观测成果,提升微波降水观测能力,其观测方法及降水

① (图 5 源自 <http://pmm.nasa.gov/GPM>)

反演也为太空卫星降水观测设立了新标准。GPM 降水产品主要具有以下 3 方面特征:①对瞬时降水估计更加准确,尤其是微量降水及冷季固态降水;②在统一框架内对卫星辐射计获取的亮温数据进行交互校准;③使用 GPM 核心传感器观测得到全球水文气象数据库,取代以往依靠模型产生数据库的方式,在此基础上统一各类微波探测仪的降水反演算法。新一代 GPM 降水产品与以往的卫星降水产品相比具有更高的精度、更大的覆盖范围、更高时空分辨率,对水文、气象、农业和灾害等学科的研究和应用均具有重要意义,它能够加深研究者对全球水圈及其对气候变化影响的理解,增强对洪水、干旱和泥石流等自然灾害的预报能力,提升对淡水资源的监测管控能力,增强农作物产量预报能力等。相信随着 GPM 数据的发布以及相关研究的增多,研究者们能够对 GPM 有更加深入的认识。

#### 参考文献(References):

- [1] Trenberth K E, Smith L, Qian T, *et al.* Estimates of the Global Water Budget and Its Annual Cycle Using Observational and Model Data[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(4):758-769.
- [2] Futrell J H, Gephart R E, Kabat-Lensch E, *et al.* Water: Challenges at the Intersection of Human and Natural Systems [R]. PNNL (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States)), 2005.
- [3] Villarini G, Vitold F K. Empirically-based Modeling of Spatial Sampling Uncertainties Associated with Rainfall Measurements by Rain Gauges[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(7):1015-1023.
- [4] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, *et al.* The Global Precipitation Measurement Mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(5):701-722.
- [5] Hong Y, Chen S, Xue X, *et al.* Global Precipitation Estimation and Applications: Multiscale Hydrologic Remote Sensing: Perspectives and Applications[M]. CRC Press, 2012:371-386.
- [6] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, *et al.* The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3):809-817.
- [7] Liu Yuanbo, Fu Qiaoni, Song Ping, *et al.* Satellite Retrieval of Precipitation: An Overview[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11):1162-1172. [刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11):1162-1172.]
- [8] Adler R F, Bolvin D, Gruber A, *et al.* The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979 ~ Present) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6):1147-1167.
- [9] Xie P, Arkin P A. Global Precipitation: A 17-year Monthly Analysis based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(11):2539-2558.
- [10] Huffman G J, Adler R F, Morrissey M M, *et al.* Global Precipitation at One-degree Daily Resolution from Multisatellite Observations[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2001, 2(1):36-50.
- [11] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, *et al.* The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-sensor Precipitation Estimates at Fine Scales[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(1):38-55.
- [12] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, *et al.* CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3):487-503.
- [13] Sorooshian S, Hsu K, Gao X, *et al.* Evaluation of PERSIANN System Satellite-based Estimates of Tropical Rainfall[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(9):2035-2046.
- [14] Turk F J, Miller S D. Toward Improved Characterization of Remotely Sensed Precipitation Regimes with MODIS/AMSR-E Blended Data Techniques[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(5):1059-1069.
- [15] Kubota T, Shige S, Hashizume H, *et al.* Global Precipitation Map Using Satellite-borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7):2259-2275.
- [16] Kidd C, Kniveton D R, Todd M C, *et al.* Satellite Rainfall Estimation Using Combined Passive Microwave and Infrared Algorithms [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6):1088-1104.
- [17] Hong Y, Hsu K, Sorooshian S, *et al.* Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Network-cloud Classification System[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43:1834-1852.
- [18] Ashouri H, Hsu K, Sorooshian S, *et al.* PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(1):69-83.
- [19] Yong B, Ren L, Hong Y, *et al.* Hydrologic Evaluation of Multisatellite Precipitation Analysis Standard Precipitation Products in Basins beyond Its Inclined Latitude Band: A Case Study in Laohahe Basin, China [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7):W07542.
- [20] Xue X, Hong Y, Limaye A S, *et al.* Statistical and hydrological Evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over The Wangchu Basin of Bhutan: Are the Latest Satellite Precipitation Products 3B42V7 Ready for Use in Ungauged Basins? [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 499:91-99.
- [21] Yong B, Chen B, Gourley J J, *et al.* Intercomparison of the Version-6 and Version-7 TMPA Precipitation Products over High and Low Latitudes Basins with Independent Gauge Networks: Is the Newer Version Better in Both Real-time and



- Post-real-time Analysis for Water Resources and Hydrologic Extremes? [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 77-87.
- [22] Wang J, Hong Y, Gourley J, *et al.* Quantitative Assessment of Climate Change and Human Impacts on Long-term Hydrologic Response: A Case Study in A Sub-basin of the Yellow River, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 30 (14): 2130-2137.
- [23] Hong Y, Adler A R. Estimation of Global NRCS-CN (Natural Resource Conservation Service Curve Numbers) Using Satellite Remote Sensing and Geospatial Data. [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29: 471-477.
- [24] Wang J, Hong Y, Li L, *et al.* The Coupled Routing and Excess Storage (CREST) Distributed Hydrological Model [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(1): 84-98.
- [25] Smith E A, Asrar G, Furuhashi Y, *et al.* International Global Precipitation Measurement (GPM) Program and Mission: An Overview; Measuring Precipitation from Space [M]. Netherlands: Springer, 2007: 611-653.
- [26] Shen Y, Xiong A, Wang Y, *et al.* Performance of High-Resolution Satellite Precipitation Products over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 ~ 2012), 2010, 115 (D2) doi:10.1029/2009JD012097.
- [27] Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, *et al.* Rain-profiling Algorithm for the TRMM Precipitation Radar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2038-2052.
- [28] Maréchal V, Mahfouf J. Experiments on 4D-Var Assimilation of Rainfall Data Using an Incremental Formulation [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, 129 (594): 3137-3160.
- [29] Hou A Y, Zhang S Q, Reale O. Variational Continuous Assimilation of TMI and SSM/I Rain Rates: Impact on GEOS-3 Hurricane Analyses and Forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(8): 2094-2109.
- [30] Aonashi K, Yamazaki H, Kamahori H, *et al.* Variational Assimilation of TMI Rain Type and Precipitation Retrievals into Global Numerical Weather Prediction [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(2): 23.
- [31] Nijssen B, Lettenmaier D P. Effect of Precipitation Sampling Error on Simulated Hydrological Fluxes and States; Anticipating the Global Precipitation Measurement Satellites [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109 (D2). doi:10.1029/2003JD003437.

## An Overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission and It's Latest Development

Tang Guoqiang<sup>1</sup>, Wan Wei<sup>1,2</sup>, Zeng Ziyue<sup>1</sup>, Guo Xiaolin<sup>1</sup>,  
Li Na<sup>3</sup>, Long Di<sup>1,2</sup>, Hong Yang<sup>1,2</sup>

(1. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Tsinghua University, State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Beijing 100084, China;*

3. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** GPM is designed to provide the next generation of global satellite precipitation products after TRMM, whose core observation platform has been launched on February 28, 2014. The satellite constellation currently consists of 10 satellites, which is likely to expand in the future. To date, however, the latest paper devoted to the GPM mission and its newest products still lack in China. GPM precipitation products are divided into four levels with higher accuracy, greater coverage, higher spatial and temporal resolution compared with previous satellite precipitation products. Particularly, GPM can provide rain and snow data within three hours based on microwave or half hour based on microwave-IR IMERG algorithm, and is anticipated to promote the development of a multitude of disciplines like hydrology, meteorology, agriculture, and disaster. Compared with the TRMM which focus on the observation of precipitation in tropical and sub-tropical regions, GPM can capture light rainfall ( $< 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) and solid precipitation more accurately, both critical precipitation types for the high-latitude and high-altitude regions. In this paper, we elaborated the GPM core observation, algorithm and products, ground verification and potential application prospects of the GPM mission, aiming to promote global precipitation related research and applications in China.

**Key words:** GPM; TRMM; Precipitation Measurement; Hydrometeorology