暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于风云三号F星被动微波观测的水凝物反演算法研究

马新斌 李小青 吴邦海 王雨 席静 张珏成 王付强

The study on a retrieval algorithm of multiple hydrometeors based on passive microwave observations from the FY-3F satellite

MA Xinbin，LI Xiaoqing，WU Banghai，WANG Yu，XI Jing，ZHANG Juecheng，WANG Fuqiang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2026-063

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

洋面云液态水的星载被动微波仪器遥感反演研究进展

Research progress on retrieval algorithms of cloud liquid water over ocean based on remote sensing by satellite-borne passive microwave instruments

暴雨灾害. 2021, 40(3): 217-230 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.001

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

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

暴雨灾害. 2023, 42(5): 489-498 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-106

基于微波辐射计观测亮温数据集的神经网络训练反演研究

Research on neural network training retrieval based on microwave radiometer observed brightness temperature data set

暴雨灾害. 2022, 41(4): 477-487 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.012

卫星遥感降水潜热的查表法和物理反演法简介

Review of satellite retrieval of latent heating released from precipitation by Look-Up Table and physical retrieval methods

暴雨灾害. 2021, 40(3): 259-270 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.004

晴空时微波辐射计温度廓线反演误差分析

Bias analysis of retrieval profile of temperature with microwave radiometer in clear sky

暴雨灾害. 2022, 41(6): 720-726 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-194

FY-4A卫星夜间大雾识别及其在高速公路服务应用中的潜力分析

Night heavy fog identification based on FY-4A satellite and its potential analysis in the service of expressway

暴雨灾害. 2021, 40(2): 190-200 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.011

关注微信公众号，获得更多资讯信息

马新斌,李小青,吴邦海,等.2026.基于风云三号 F 星被动微波观测的水凝物反演算法研究[J].暴雨灾害,45(5):654−665. MA Xinbin, LI Xiaoqing, WU Banghai, et al. 2026. The study on a retrieval algorithm of multiple hydrometeors based on passive microwave observations from the FY-3F satellite [J]. Torrential Rain and Disasters,45(5):654−665 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2026−063

基于风云三号 F 星被动微波观测的水凝物反演算法研究

马新斌[1], 李小青[2], 吴邦海[3], 王雨[1, 4], 席静[1], 张珏成[1], 王付强[1]

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院 风云遥感联合实验室, 合肥 230026; 2. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081; 3. 中国航空工业集团雷华电子技术研究所, 无锡 214063; 4. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 雄安新区 071800)

摘　要: 基于星载被动微波传感器获得的全球云与降水反演数据对于理解各种灾害性天气和气候变化的发生发展机理至关重要。针对我国新一代上午轨道业务星 FY-3F 搭载的微波成像仪-II 型 (Micro-Wave Radiation Imager-II, MWRI-II), 基于贝叶斯理论, 结合具有完整代表性和准确性的先验数据库, 构建了一套地表降水率及云液态水、雨水及冰水含量等多种水凝物廓线的反演算法, 并进行了算法验证及反演结果评估。试验结果表明, 该算法具有较高的准确性, 各反演物理量与参考值的平均偏差在个位数量级。实际反演结果与全球卫星降水观测计划 (Global Precipitation Measurement Mission, GPM) 的戈达德廓线降水反演算法 (Goddard Profiling Algorithm, GPROF) 产品及 FY-3G 的多种水凝物廓线 (Multiple-Hydrometeor Profile, MHP) 产品的对比评估显示, 在 2024 年 5—7 月期间、覆盖中国及其周边地区的统计平均结果中, 三种数据的空间分布特征基本吻合, 空间相关系数均在 0.60 以上, 最高达 0.83。此外, 与 MHP 产品的平均差异均在 10% 左右。该反演算法不依赖外部辅助数据, 可为 FY-3F 卫星云降水业务化产品的构建提供技术支撑, 并可推广至具有相近通道配置的其他风云系列卫星搭载的被动微波辐射计, 这对于未来多星协同观测具有重要意义。

关键词: 多种水凝物反演; FY-3F 卫星; 被动微波; MWRI-II

中图法分类号: P412.27　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2026−063

The study on a retrieval algorithm of multiple hydrometeors based on passive microwave observations from the FY-3F satellite

MA Xinbin[1], LI Xiaoqing[2], WU Banghai[3], WANG Yu[1, 4], XI Jing[1], ZHANG Juecheng[1], WANG Fuqiang[1]

(1. *School of Earth and Space Sciences*, *Joint Laboratory of Fengyun Remote Sensing*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026; 2. *National Satellite Meteorological Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081; 3. *Aviation Industry Corporation of China Leihua Electronic Technology Institute*, *Wuxi* 214063; 4. *China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory*, *Xiong'an New Area* 071800)

Abstract: Global cloud and precipitation data derived from satellite-based passive microwave sensors are essential for understanding the formation and evolution mechanisms of hazardous weather events and climate change. Focusing on Micro-Wave Radiation Imager-II (MWRI-II) onboard FY-3F, China's new-generation morning-orbit operational meteorological satellite, a retrieval algorithm based on Bayesian theory and a highly representative and physically accurate prior database is developed. The algorithm retrieves surface precipitation rates and vertical profiles of multiple hydrometeors, including cloud liquid water, rainwater, and ice water, and is further validated and evaluated. The validation results based on simulations demonstrate that the proposed algorithm has very high accuracy, with the mean bias of the retrieved physical quantities and reference values of any hydrometeor being within 10 $g \cdot m^{-2}$. The comparison of the retrieval results based on FY-3F measurements with FY-3G Multiple-Hydrometeor Profile (MHP) products and Goddard Profiling Algorithm (GPROF) products of Global Precipitation Measurement Mission (GPM) shows that for the statistical analysis over China and

收稿日期: 2026−03−16; **定稿日期**: 2026−06−29

资助项目: 国家自然科学基金气象联合基金重点项目 (U2542205); 安徽省自然科学基金江淮气象联合基金项目 (2408055UQ005); 中国气象局科技创新项目 (CMAJBGS202502)

第一作者: 马新斌, 主要从事星载被动微波遥感研究。E-mail: pb1438@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 王雨, 主要从事卫星遥感与气溶胶-云-降水相互作用研究。E-mail: wangyu09@ustc.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

its surrounding regions during May–July 2024, the spatial distributions of the three datasets are generally consistent with correlation coefficients above 0.60, reaching up to 0.83. In addition, the relative biases between the retrieved parameters and those in the MHP product are all about 10%. Note that the algorithm does not rely on any other auxiliary data and can provide technical support for the operational deployment of the cloud-precipitation products for FY-3F, while also being applicable to passive microwave radiometers with similar channel configurations onboard other Fengyun satellites, thereby offering significant potential for future multi-satellite collaborative observation strategies.

Key words: retrieval of multiple hydrometeors; FY-3F satellite; passive microwave; MWRI-II

引　言

云与降水是支配地气系统能量收支与天气尺度环流演变的核心大气要素。云通过反射太阳短波辐射与吸收地表长波辐射并再发射过程, 直接影响地球的辐射收支平衡与大气热力结构 (Stephens et al., 2002)。而降水凝结所伴随的潜热释放, 则是驱动风暴系统发展及全球能量再分配的关键 (Stephens and Kummerow, 2007; Hou et al., 2014)。但是, 当前对云液态水、冰水含量向降水转化效率的定量认知仍存在显著不足 (Stephens et al., 2002), 相关参数的不确定性被证实是气候敏感性估计与数值模式模拟误差的重要来源 (Stephens, 2005; IPCC, 2021; 康兆萍等, 2019)。因此, 云与降水的全球分布及物理特性被全球气候观测系统 (Global Climate Observing System, GCOS) 列为基本气候变量, 获取其高精度观测数据已成为国际学术界的重大科学优先事项 (GCOS, 2022)。

对于卫星遥感而言, 相比于可见光和红外波段只能获取云顶信息且易发生信号饱和 (傅云飞, 2019; Kidd et al., 2021), 被动微波探测凭借更长的波长对云层的穿透能力已成为当前获取全球云和降水参数最有效的手段之一 (李洪兵等, 2024; Rouzegari et al., 2025; 张萍萍等, 2020)。其物理基础在于不同频率的微波通道对不同相态和尺度的水凝物具有选择性响应。在低频通道 (如 10-37 GHz), 云液态水和雨滴的热发射信号在低发射率的海洋背景下表现为明显的“增温效应”, 由此可实现对云液态水及洋面降水的反演 (傅云飞, 2021); 而在高频通道 (如 89 GHz 及以上), 当波长与云层冰相粒子尺度相当时, 散射效应导致的亮温降低成为识别强对流系统及反演陆面降水的重要特征 (Spencer et al., 1989; 袁敏等, 2023)。

鉴于微波遥感的独特优势, 国际上自 20 世纪 70 年代起便开启了星载微波辐射计的研发与业务化进程。从美国 Nimbus 系列卫星搭载的电子扫描微波辐射计 (Electrically Scanning Microwave Radiometer, ESMR) 和扫描式多通道微波辐射计 (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, SMMR), 到 2025 年日本最新发射的高级微波扫描辐射计 3 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 3, AMSR3), 星载微波辐射计在频率配置与空间分辨率方面不断优化, 为全球云和降水监测提供了重要数据基础 (Levizzani et al., 2020; Kachi et al., 2023; Liu et al., 2023)。

我国星载微波成像仪的发展虽起步较晚, 但进展迅速。FY-3A 和 FY-3B 搭载自主研制的微波成像仪 I 型(Micro-Wave Radiation Imager-I, MWRI-I), 实现了从无到有的突破 (Yang et al., 2011)。随着 FY-3C 及后续业务卫星的运行, 通过改进定标技术, 国产微波成像仪的数据质量显著提升, 并逐步具备与 GMI 等国际基准仪器相当的观测能力 (Zeng et al., 2019; Zhang et al., 2019; Wu et al., 2020; Fu et al., 2025)。近年来, 随着降水测量专用卫星 FY-3G 的发射, 我国已初步构建起多轨道协同的全球观测体系, 为云和降水的多尺度监测提供了丰富的数据源 (Zhang et al., 2023)。作为该体系中新一代上午轨道业务星, FY-3F 于 2023 年 8 月 3 日发射, 所搭载的 MWRI-II 在继承 MWRI-I 优良特性的基础上进一步优化了观测灵敏度和定位精度 (Yang et al., 2024; Tang et al., 2026)。该卫星现已与 FY-3 系列其他卫星以及美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 系列卫星和气象业务极轨卫星 (Meteorological Operational Satellite, METOP) 组成全球观测系统, 为数值天气预报提供 4 h 刷新率的全球数据覆盖, 能够用于显著提高全球数值天气预报的准确性 (Wang et al., 2024)。目前已有研究开始探索 FY-3F/MWRI-II 在地表温度、雪水当量及多源数据融合中的应用 (Yang et al., 2024; Chen et al., 2025), 表明其在地球系统观测中的潜在价值。但在云和降水参数反演方面, 尚缺乏成熟且系统的反演方法, 亟需建立适配其仪器特性的反演算法, 以获取高质量业务产品。

星载被动微波云降水反演算法主要可分为统计方法、物理方法及物理-统计相结合的方法三类 (Kummerow et al., 2011; Liu et al., 2022)。其中, 统计方法是利用回归分析 (Spencer et al., 1989; Wilheit et al., 1991; Weng and Grody, 1994) 或机器学习 (Manfred

et al., 2018; Chen et al., 2019) 手段，基于大量匹配样本直接建立亮温与降水参数的映射关系。该类方法虽然计算高效且无需复杂的辐射传输计算，但该方法缺乏明确的物理机制支撑，且反演精度严重依赖于训练样本的代表性。相比之下，物理方法则基于辐射传输理论建立卫星观测量与云和降水之间的物理联系 (Bauer and Schluessel, 1993; Boukabara et al., 2011; Chen et al., 2025)。但需要大量辐射计算，计算速度慢且要求已知精确的大气背景信息，或采用一定的假设条件从而降低了精度。为兼顾两类方法的优势，物理-统计方法应运而生。其中，贝叶斯反演技术作为当前应用最为广泛的代表性方法之一 (McFarlane et al., 2002; Kummerow et al., 2015; Kidd et al., 2021)，通过使用一个包含大量“云/降水-模拟亮温”的先验数据库计算先验概率和条件概率，并基于贝叶斯理论计算后验概率，最终实现对云和降水的估计。它不仅能提供地表降水率 (Surface Precipitation Rate, SPR) 的准确估计，也能同步反演得到云液态水、冰水和雨水等多种水凝物的垂直廓线分布 (Utsumi et al., 2020)，有助于理解整个降水系统演变机制，以及云和降水的长期变化特征 (李书磊等, 2017)。

鉴于此，本文旨在针对 FY-3F 卫星所搭载的微波成像仪 MWRI-II 的仪器特性，构建一套基于贝叶斯原理的多种水凝物廓线与地表降水率反演算法，并对算法进行验证以及对反演结果进行评估，以期为相应云和降水业务化产品的构建提供技术支撑。

1 卫星仪器以及数据和方法

1.1 卫星仪器及数据

FY-3F/MWRI-II 是一部拥有 22 个通道的圆锥扫描被动微波辐射计，地球入射角 52°左右。它在继承上一代 MWRI-I 通道设置的基础上，增加了 50—60 GHz 波段和 118 GHz 波段的温度探测通道，从而提升了仪器的整体观测能力。如表 1 所示，在 10—89 GHz 频段设置 9 个频点，每个频点均具备垂直 (V) 和水平 (H) 双极化观测能力；在 118 GHz 设置 4 个通道，均为垂直极化。本文使用了该仪器 2024 年 5—7 月的 L1 级多通道亮温产品 (http://satellite.nsmc.org.cn/)，该产品主要包含时间码、地理定位结果、观测亮温以及质量标识等信息，每天生成约 28 个轨道文件，重采样后的空间分辨率为 10 km (武胜利, 2025)。

1.2 先验数据集的构建

贝叶斯反演算法 (Kummerow et al., 2015) 的核心在于构建一个具有完整气象场景代表性且兼具物理一致性的先验数据库，其质量直接决定了反演结果的准确性。

一般而言，此类数据集包括两部分，即地球物理状态向量和仪器多通道亮温。对于本文而言，地球物理状态向量又可分为地表及大气温湿度等环境变量和水凝物廓线两大类。其中，大气环境背景场参数数据源自欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的第五代再分析资料 (ECMWF Reanalysis v5, ERA5)

表 1 FY-3F/MWRI-II 通道技术参数

Table 1 Technical parameters of FY-3F/MWRI-II channels

中心频率/GHz	极化	带宽/MHz	频率稳定度/MHz	灵敏度/K	测量精度/K	空间分辨率/km^2	主要应用
10.65	V, H	180	10	0.5	0.8	51×85	洋面强降水，陆表
18.7	V, H	200	10	0.5	0.8	30×50	洋面降水，陆表
23.8	V, H	400	15	0.5	0.8	27×45	洋面水汽总量
36.5	V, H	900	20	0.5	0.8	18×30	降水，陆表
50.30	V, H	400	25	0.5	0.8	9×15	降水、毛毛雨、降雪、融化层
52.61	V, H	400	25	0.5	0.8	9×15	
53.24	V, H	400	25	0.5	0.8	9×15	
53.75	V, H	400	25	0.5	0.8	9×15	
89.0	V, H	3 000	25	0.5	0.9	9×15	洋面和陆地区域降水、降雪，陆表
118.750 3±3.2	V	2×500	25	0.8	1.2	9×15	降水、弱降水、降雪、融化层
118.750 3±2.1	V	2×400	25	0.8	1.2	9×15	
118.750 3±1.4	V	2×400	25	0.8	1.2	9×15	
118.750 3±1.2	V	2×400	25	0.8	1.2	9×15	

(Hersbach et al., 2020), 该资料可提供从地面至高空的 37 层精细化大气温湿压廓线、地表温度及 10 m 风场等关键变量, 可为后续的辐射传输计算提供热力学环境与下垫面边界条件。而地表降水率及多种水凝物的垂直分布信息则源自全球卫星降水观测计划 (Global Precipitation Measurement Mission, GPM) 的戈达德廓线降水反演算法 (Goddard Profiling Algorithm, GPROF) 产品 (Wentz and Draper, 2016)。作为目前全世界最主流的一种被动微波反演数据, 该产品涵盖了云液态水含量 (Cloud Liquid Water Content, CLWC)、雨水含量 (Rain Water Content, RWC) 和冰水含量 (Ice Water Content, IWC) 等多种水凝物含量的垂直廓线, 有效弥补了再分析资料在云微物理结构精细描述方面的不足, 其水平分辨率为 11 km×18 km, 垂直方向上共 28 层, 在 10 km 以下分辨率为 0.5 km, 在 10 km 以上为 1 km。

随后, 以 GPM/GPROF 产品分辨率为标准, 通过时空匹配将两套数据集进行融合, 在时间匹配方面, 考虑到 ERA5 数据时间分辨率为 1 h, 选取与 GPM/GPROF 像素最接近的整点时次的温度、湿度廓线及地表参数进行时间匹配; 空间上, 选取 GPM/GPROF 对应像素所在的 0.25°网格数据进行匹配; 在垂直方向上, 采用线性插值方法将 ERA5 廓线数据插值到 GPM/GPROF 对应高度。

在时空覆盖上, 本文选取上述融合数据 2015—2019 年间覆盖中国及其周边地区 (70°—140°E, 10°—60°N) 的观测样本 (约 10^8 条), 以完整体现在该区域的各种地气参数变化特征。考虑到 GPM/GPROF 产品本身可能存在反演误差, 故为了确保与真实大气状态更为一致, 通过一维变分方法对地表发射率和水凝物廓线进行调整, 使其与 GMI 观测结果更加吻合 (Yin and Liu, 2017)。这里需要提及的是, 该调整后的地球物理状态向量数据集也被成功用于针对 FY-3G 卫星所搭载的微波成像仪-降水型 (Micro-Wave Radiation Imager -Rainfall Mission, MWRI-RM) 的降水反演算法构建, 并取得了很好的效果 (Wu et al., 2026)。

本文以该地球物理状态向量数据集作为输入, 利用平面平行辐射传输模式 MWRT (Liu, 1998), 针对 MWRI-II 的通道特性及几何参数进行了相应的正演辐射计算, 从而获得对应的各个通道亮温, 由此建立了一套物理一致性强、且完全适配 MWRI-II 特性的先验数据库, 从而为后续基于贝叶斯原理的反演算法构建提供可靠的先验约束。

1.3 贝叶斯反演算法

本文所反演的降水参数包括地表降水率以及云液态水、雨水和冰水含量的垂直廓线, 其中廓线分层与 GPM/GPROF 产品一致。由于本文旨在构建能够用以生成实时业务化产品的反演算法, 故输入量仅包含 MWRI-II 亮温。根据概率论和贝叶斯公式, 对于给定的由 MWRI-II 全部通道亮温组成的观测向量 y, 所反演的降水参数向量 $\boldsymbol{x}$ (即地表降水率和水凝物廓线) 的期望值 $E(\boldsymbol{x})$ 可以表示为 (Wu et al., 2026)

$$E(\boldsymbol{x}) = \int_0^{+\infty} \boldsymbol{x} P(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y}) \mathrm{d}\boldsymbol{x} = \int_0^{+\infty} \boldsymbol{x} \frac{P(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x})P(\boldsymbol{x})}{P(\boldsymbol{y})} \mathrm{d}\boldsymbol{x} \approx \frac{\sum_i \boldsymbol{x}_i P(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x}_i)}{\sum_i P(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x}_i)} \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{x}_i$ 是先验数据库中的第 i 个样本。项 $P(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{x}_i)$ 是在给定 $\boldsymbol{x}_i$ 的条件下观测到 $\boldsymbol{y}$ 的条件概率, 它由 $\boldsymbol{y}$ 与 $\boldsymbol{x}_i$ 对应的亮温 $H(\boldsymbol{x}_i)$ 之间的偏差决定。假设该偏差是无偏的且服从高斯分布, 则期望值可以表示为 (Kummerow et al., 2015)

$$E(\boldsymbol{x}) = \frac{\sum_i \boldsymbol{x}_i \exp(-0.5[\boldsymbol{y} - H(\boldsymbol{x}_i)]^T \boldsymbol{R}^{-1} [\boldsymbol{y} - H(\boldsymbol{x}_i)])}{\sum_i \exp(-0.5[\boldsymbol{y} - H(\boldsymbol{x}_i)]^T \boldsymbol{R}^{-1} [\boldsymbol{y} - H(\boldsymbol{x}_i)])} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{R}$ 是观测误差协方差矩阵。

在实际反演过程中, 考虑到复杂下垫面对微波信号的影响, 故将下垫面分为四种类型: 海洋、海岸、低海拔陆地和高海拔区域 (超过 2 500 m), 分别利用先验数据库中相应区域范围的子集来进行反演。在获得各种水凝物廓线后, 可进一步通过垂直积分, 获得其对应的柱积分量: 云液态水路径 (Cloud Liquid Water Path, CLWP)、雨水路径 (Rain Water Path, RWP) 和冰水路径 (Ice Water Path, IWP)。

2 算法验证与反演结果评估

2.1 算法验证

本文从先验数据库中随机抽取 80% 样本来构建贝叶斯反演所需数据库, 剩余 20% 的样本构建测试集用以进行反演仿真验证。图 1 展示了云液态水、雨水、冰水路径及地表降水率的反演结果与测试集参考真值的散点密度对比。总体而言, 各种反演值均紧密分布在对角线附近。特别地, 算法在海洋背景下表现更佳, 各参数的相关系数 (R) 均在 0.96 以上, 水凝物积分量的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 均小于 50 g·m^{-2}, 地表降水率的 RMSE 也仅有 0.5 mm·h^{-1}。相比之下, 受陆地复杂地表发射率的影响, 反演结果的 RMSE 略有升高, 但各参数的

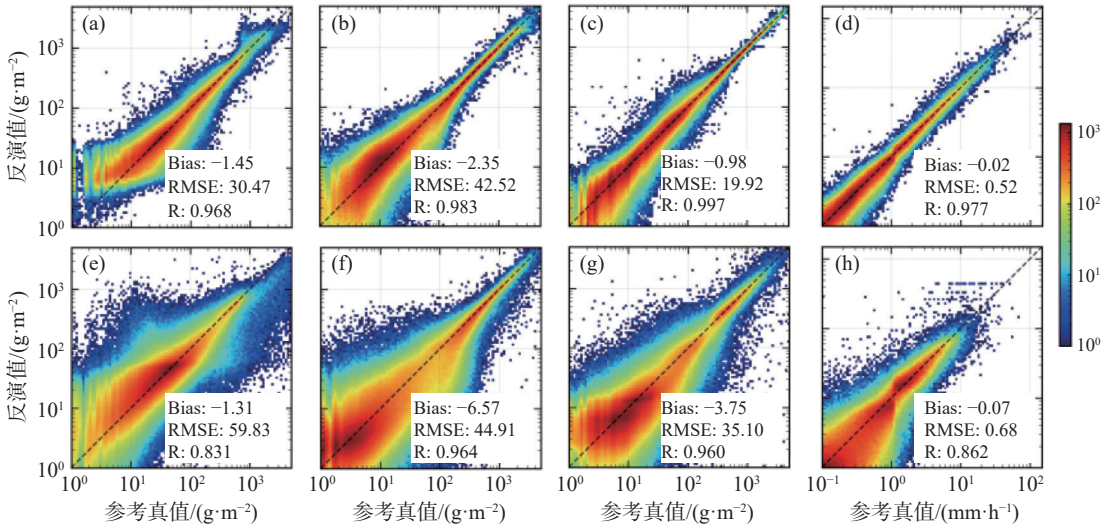


图 1 洋面 (a—d) 和陆面 (e—h) 的云液态水 (a、e)、冰水 (b、f)、雨水 (c、g) 路径和地表降水率 (d、h) 的反演结果与参考真值的密度散点图 (色标表示数据点的密度, 其中红色表示密度较高, 蓝色表示密度较低, 下同)

Fig. 1 Density scatter plots of retrieved versus reference values for (a, e) Cloud Liquid Water Path (CLWP), (b, f) Ice Water Path (IWP), (c, g) Rain Water Path (RWP), and (d, h) Surface Precipitation Rate (SPR) over (a-d) ocean and (e-h) land regions (The color scale represents point density, with red indicating higher density and blue indicating lower density, the same hereinafter)

相关系数仍均在 0.83 以上。

为进一步展示算法在强降水天气下的适用性, 图 2 给出了测试集中 2015 年 7 月 6 日发生于中国南海海域的一次典型海洋降水系统个例 (GMI 轨道号: 007682) 的反演结果。可以看出, 反演得到的云液态水、雨水、冰水路径及地表降水率均与参考值保持了

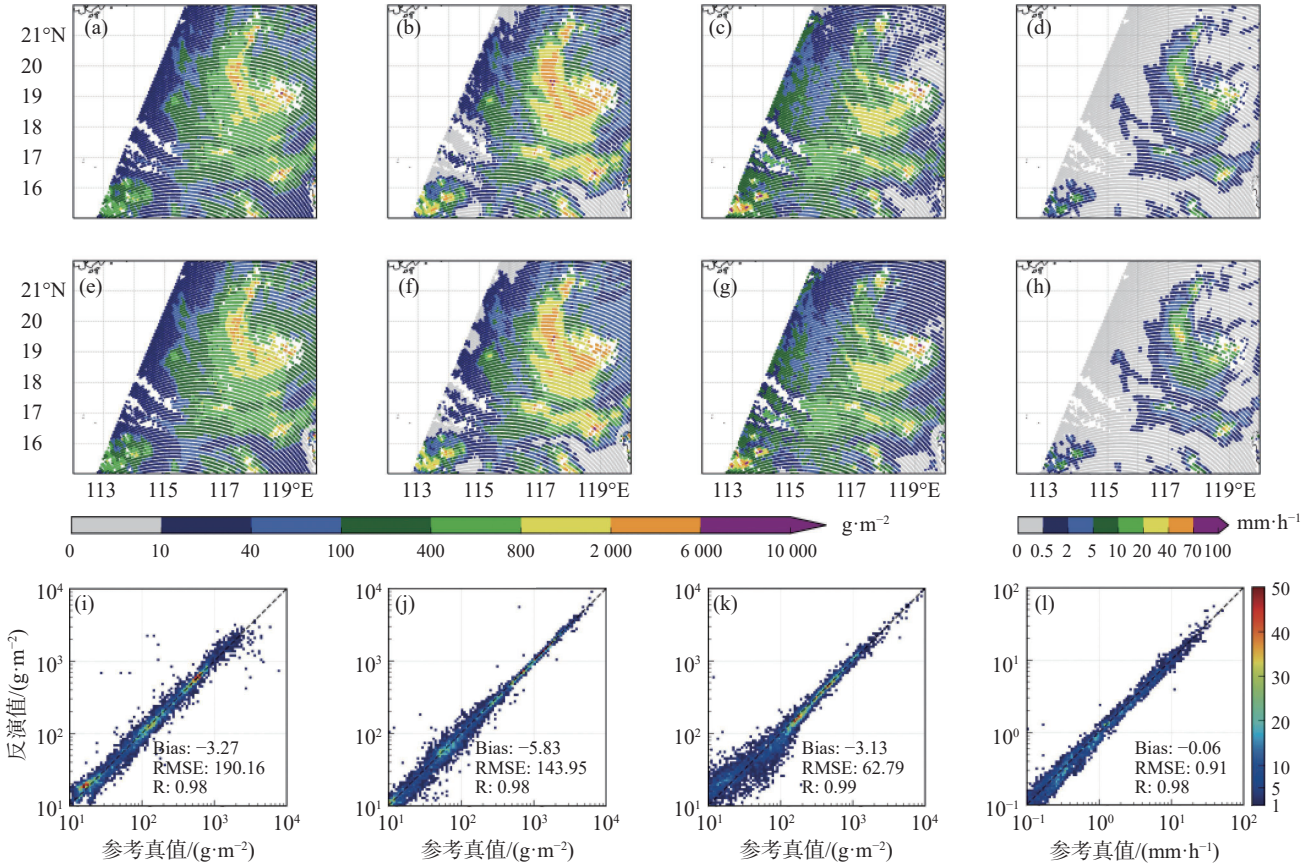


图 2 2015 年 7 月 6 日洋面降水系统的云液态水路径 (a、e、i)、雨水路径 (b、f、j)、冰水路径 (c、g、k) 和地表降水率 (d、h、l) 的参考真值 (a—d)、反演结果 (e—h) 及反演结果与参考真值的密度散点图 (i—l)

Fig. 2 The (a-d) reference values, (e-h) retrieval results, and (i-l) density scatter plots of retrieval results versus reference values of (a, e, i) CLWP, (b, f, j) RWP, (c, g, k) IWP, and (d, h, l) SPR in oceanic precipitation systems on July 6, 2015

高度的空间分布一致性。在统计验证方面, 二者也具有很好的一致性, 散点集中分布在对角线附近, 各水凝物积分量及地表降水率与参考真值之间的相关系数均超过 0.98。尤其是各种反演量的平均偏差均在个位数量级, 这再次表明算法本身具有很好的准确性。

2.2 反演结果评估

将该算法应用于 FY-3F/MWRI-II 的实际观测, 即可获取相应的多种水凝物反演结果。考虑到 FY-3G 卫星的 MHP 产品是基于与本文相似的贝叶斯反演算法所生成 (Wu et al., 2026), 因此本文首先利用该产品对 FY-3F 反演结果进行个例评估, 共选取三个基于实测的典型降水个例进行对比分析。第一个个例发生于 2024 年 6 月 9 日中国东海附近海域 (120°—130°E, 20°—30°N), FY-3G 卫星于 12:32 (世界时, 下同) 首先过境观测该区域 (轨道号: ORBA_L1_20240609_1202), 约 40 min 后 FY-3F 卫星对同一区域进行观测 (轨道号: ORBA_L1_20240609_1241)。第二个个例为 2024 年 7 月 28 日发生在中国广东及其周边地区 (105°—115°E, 20°—30°N) 的强降雨过程, FY-3G 和 FY-3F 卫星分别于 02:40 和 03:10 观测到该过程, 轨道号分别为 ORBD_L1_20240728_0227 和 ORBD_L1_20240728_0250。另外, 为了探究反演结果对典型灾害性天气的探测能力, 第三个个例为一次台风登陆过程, 发生于 2024 年 5 月 27 日的孟加拉湾周边区域 (85°—95°E,18°—28°N), FY-3F 卫星于当日 04:31 过境观测该区域 (轨道号: ORBD_L1_20240527_0411), FY-3G 随后于 05:20 过境 (轨道号: ORBD_L1_20240527_0507)。

对于洋面降水个例, 图 3 给出两颗卫星的地表降水率和水凝物路径反演结果。从整体空间分布形态来看, 二者均清晰准确地捕捉到该降水云系呈东北—西南走向的带状结构特征。无论是高值中心, 还是外围对应的弱降水区, 两种反演结果在空间落区、形态边界上均实现了高度重合。此外, 各反演参量的高低值分布具有较强的一致性, 如地表强降水区与空中丰富的雨水路径及冰水路径高值区重合, 这与 Mo 等 (2024) 结论相符, 反映了降水的发展和形成主要受云的影响, 从而定性表明反演结果的可靠性。平均统计结果 (图 3) 也表明, 地表降水率、云水路径和雨水路径差异均较小 (≤3%), 但冰水路径差异相对较大 (约 20%)。

图 4 进一步展示了在该个例中两颗卫星的雨水含量、冰水含量和云液态水含量廓线反演结果的平均值及标准差。可以看出, 两种反演结果在不同类型水凝物含量的垂直分布形态、峰值强度及峰值高度上均展现出高度的一致性。其中, 雨水含量廓线的平均值与标准差随高度的变化曲线几乎完全重合, 体现了二者在降水反演算法上的稳健一致性。

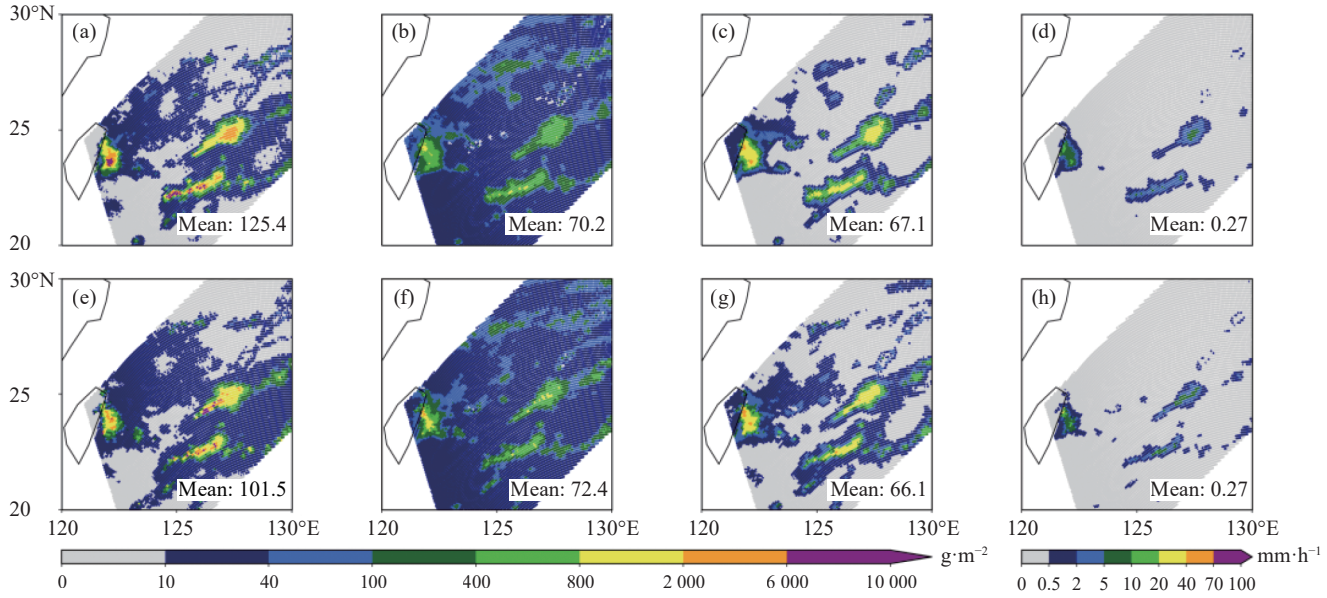


图 3 2024 年 6 月 9 日中国东海附近海域洋面个例 FY-3F 反演结果 (a—d) 及对应 FY-3G/MHP 产品 (e—h) 的冰水路径 (a、e)、云液态水路径 (b、f)、雨水路径 (c、g) 和地表降水率 (d、h) 分布图 (各子图右下角标出相应水凝物路径或地表降水率的平均值 Mean, 其单位与对应色标一致, 下同)

Fig. 3 Distribution maps of (a, e) IWP, (b, f) CLWP, (c, g) RWP, and (d, h) SPR for (a-d) FY-3F retrieved results and (e-h) corresponding FY-3G/MHP product for an oceanic case over the East China Sea near China on June 9, 2024 (The mean value of the corresponding hydrometeor path or SPR is shown in the lower-right corner of each panel, with the same unit as the corresponding color scale, the same hereinafter)

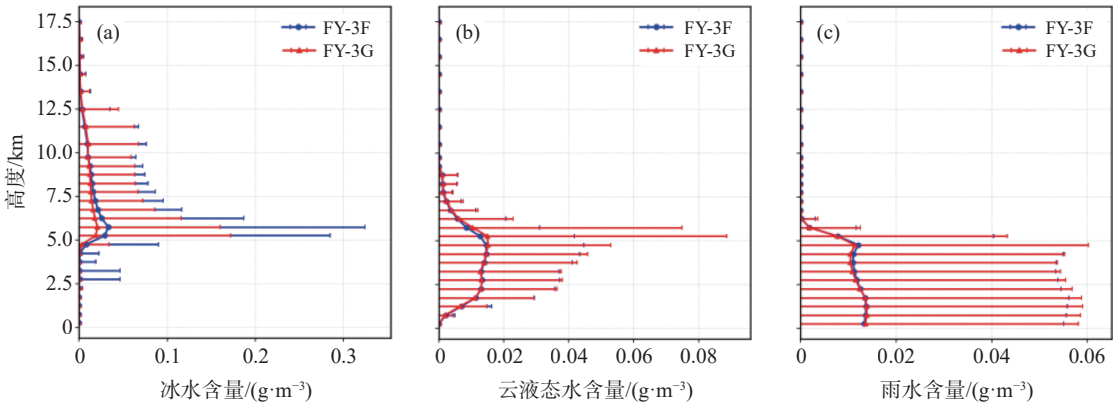


图 4 2024 年 6 月 9 日洋面个例中 FY-3F 反演结果和 FY-3G/MHP 产品的冰水含量 (a)、云液态水含量 (b) 和雨水含量 (c) 的平均垂直廓线 (水平线表示各垂直高度层上的±1 个标准差, 下同)

Fig. 4 Mean vertical profiles of (a) IWC, (b) CLWC, and (c) RWC for the FY-3F retrievals and the FY-3G/MHP product of the oceanic case on June 9, 2024 (The horizontal lines represent ±1 standard deviation at each vertical level, the same hereinafter)

相比之下, 与前述冰水路径类似, 冰水含量廓线差异略大, 这可能与 MWRI-II 相较于 MWRI-RM 缺少 165 GHz 和 183 GHz 高频通道有关。现有研究表明, 这些高频通道对冰水粒子的散射特性较为敏感, 是进行冰水探测的重要通道 (Bennartz and Bauer, 2003), 其缺失将可能影响冰水含量, 以及其路径积分的反演精度。

对于陆面降水个例, 两种反演结果在地表降水率及水凝物路径空间分布特征上体现出与前述洋面个例类似的良好一致性 (图 5)。进一步的垂直结构对比 (图 6) 显示, 二者的冰水含量差异较洋面更小。这一结果可能与陆面较强的背景辐射有关, 一方面陆面地表温度相对较高, 更重要的是陆面地表发射率通常远高于洋面, 从而产生更强的地表辐射信号。在此背景下, 即便是缺乏 165 GHz 和 183 GHz 等高频通道, FY-3F 现有高频通道 (如 89 GHz 和 118 GHz) 也能很好地捕捉陆面更强的地表发射信号受冰粒子的散射影响作用, 进而被用于相应的反演。与洋面降水相比, 该陆面个例的液相水凝物明显更为丰富, 但两套反演数据仍旧体现出垂直分布上的一致性。

对于台风登陆个例, 图 7 和图 8 分别展示了 FY-3F 反演结果与 FY-3G/MHP 产品在台风个例中的空间分布及垂直结构对比。类似于前例, 两种反演结果的各物理量在空间分布上均表现出较高一致性, 清晰地刻画了台风云系的螺旋结构及降水分布特

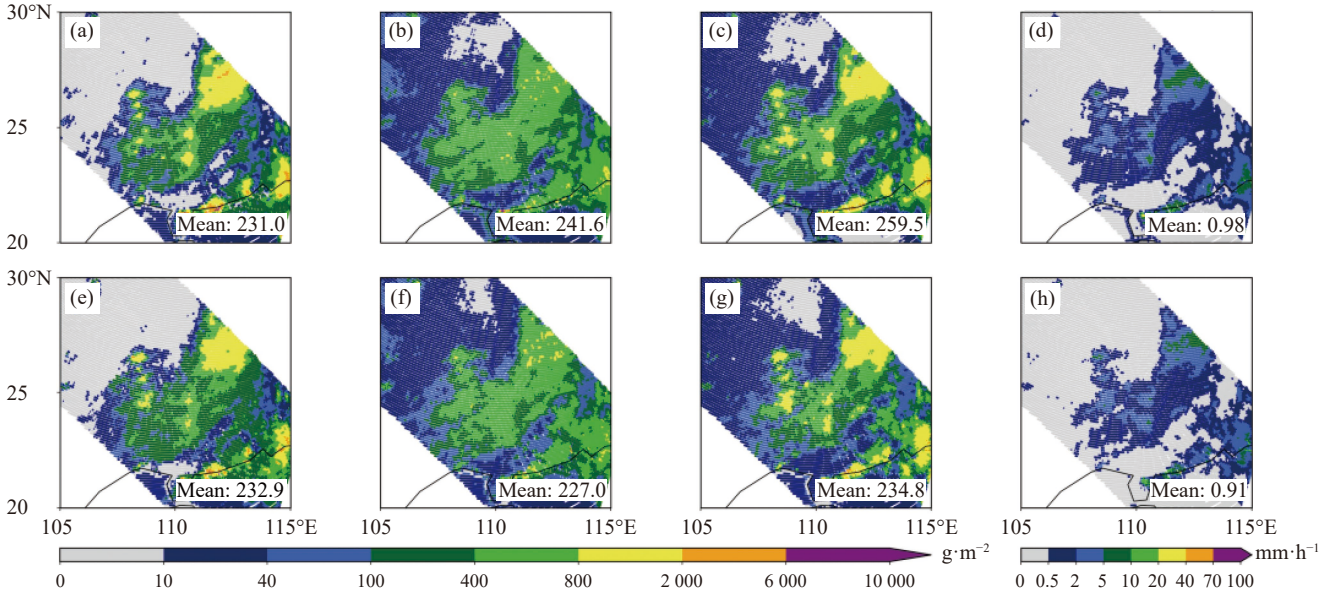


图 5 2024 年 7 月 28 日中国广东及其周边地区陆面个例 FY-3F 反演结果 (a—d) 及对应 FY-3G/MHP 产品 (e—h) 的冰水路径 (a、e)、云液态水路径 (b、f)、雨水路径 (c、g) 和地表降水率 (d、h) 分布图

Fig. 5 Distribution maps of (a, e) IWP, (b, f) CLWP, (c, g) RWP, and (d, h) SPR for (a-d) FY-3F retrieved results and (e-h) corresponding FY-3G/MHP product for a land case over Guangdong Province, China, and adjacent regions on July 28, 2024

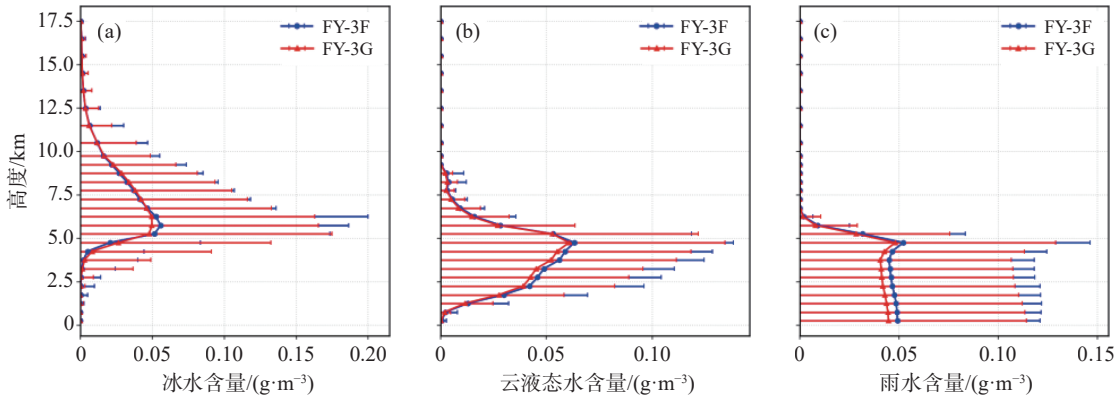


图 6 2024 年 7 月 28 日陆面个例中 FY-3F 反演结果和 FY-3G/MHP 产品的冰水含量 (a)、云液态水含量 (b) 和雨水含量 (c) 的平均垂直廓线

Fig. 6 Mean vertical profiles of (a) IWC, (b) CLWC, and (c) RWC for the FY-3F retrievals and the FY-3G/MHP product of the land case on July 28, 2024

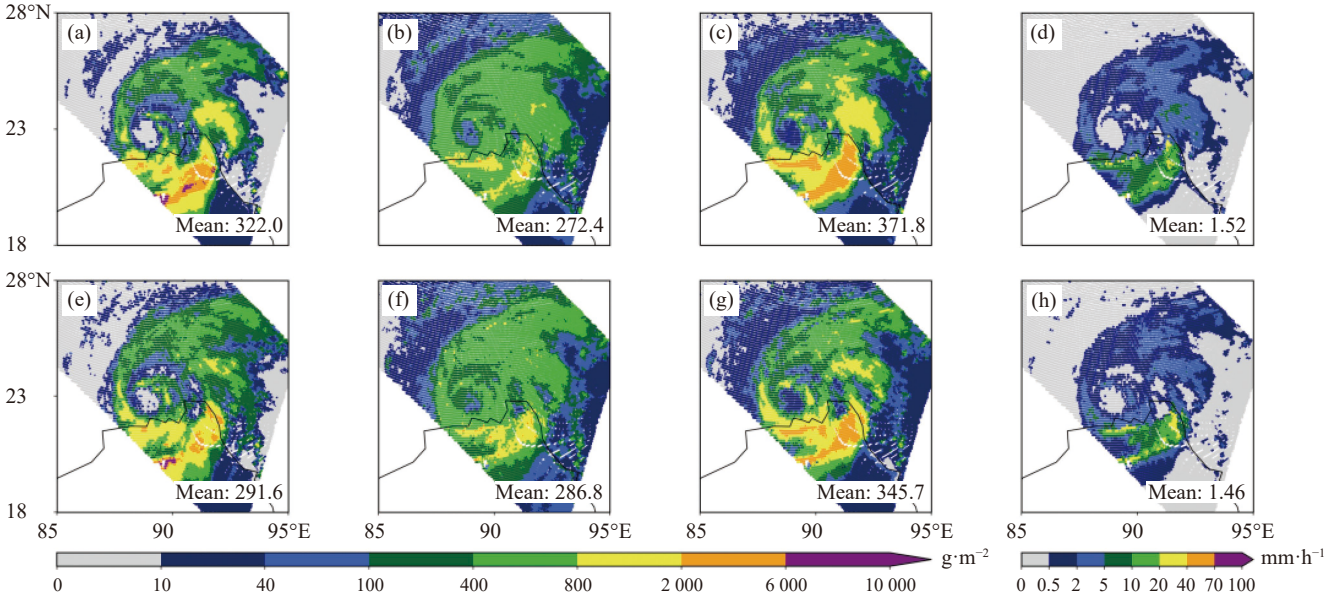


图 7 2024 年 5 月 27 日孟加拉湾周边地区台风登陆个例 FY-3F 反演结果 (a—d) 及对应 FY-3G/MHP 产品 (e—h) 的冰水路径 (a、e)、云液态水路径 (b、f)、雨水路径 (c、g) 和地表降水率 (d、h) 分布图

Fig. 7 Distribution maps of (a, e) IWP, (b, f) CLWP, (c, g) RWP, and (d, h) SPR for (a-d) FY-3F retrieved results and (e-h) corresponding FY-3G/MHP product for a typhoon landfall case over the Bay of Bengal on May 27, 2024

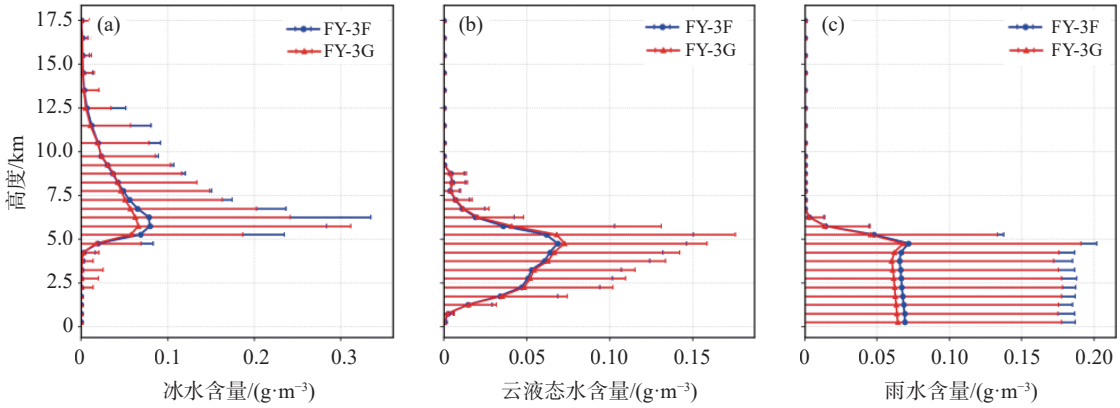


图 8 2024 年 5 月 27 日台风登陆个例中 FY-3F 反演结果和 FY-3G/MHP 产品的冰水含量 (a)、云液态水含量 (b) 和雨水含量 (c) 的平均垂直廓线

Fig. 8 Mean vertical profiles of (a) IWC, (b) CLWC, and (c) RWC for the FY-3F retrievals and the FY-3G/MHP product of the typhoon landfall case on May 27, 2024

征。无论是冰水路径、云液态水路径、雨水路径，还是地表降水率，其高值区域均主要分布于台风对流核心区及其外围螺旋雨带中，且强降水中心的位置基本一致。从垂直廓线来看，即便是两次观测相差约 50 min，两种反演结果在水凝物垂直分布结构上仍然具有较好一致性，尤其是云液态水含量。

随后，利用 FY-3G/MHP 产品以及 GPM/GPROF 产品对 FY-3F 反演结果进行统计评估。图 9 展示了在中国及周边地区 2024 年 5—7 月期间各种反演量的空间平均分布情况。整体来看，三者的地表降水率及各种水凝物积分量的空间分布特征大体一致，各项参量的高值中心均显著集中于中国南方、东南亚及孟加拉湾一带，符合东亚夏季风期间的降水空间分布特征，而在中高纬度及干旱内陆区则一致表现为低值区。此外，各种反演物理量之间亦呈现出高度的相关性，地表强降水大值区与固液相水凝物的高值区在空间上重合。FY-3G/MHP、GPM/GPROF 产品与 FY-3F 反演结果三种产品两两之间的相关系数均在 0.60 以上 (表 2)，表明它们在刻画云和降水的统计分布特征方面具有较好的一致性。相较于相关系数最高 (0.83) 的云液态水路径，冰水路径相关系数偏低，其原因可能是 GPM/GPROF 采用了与本文构建先验数据库时不一样的冰粒子模型 (Wu et al., 2026)，以及 FY-3F 的 MWRI-II 缺失了 165 GHz 及 183 GHz 高频通道等软硬件差异。

在定量分析方面，很明显地几乎各个反演量，

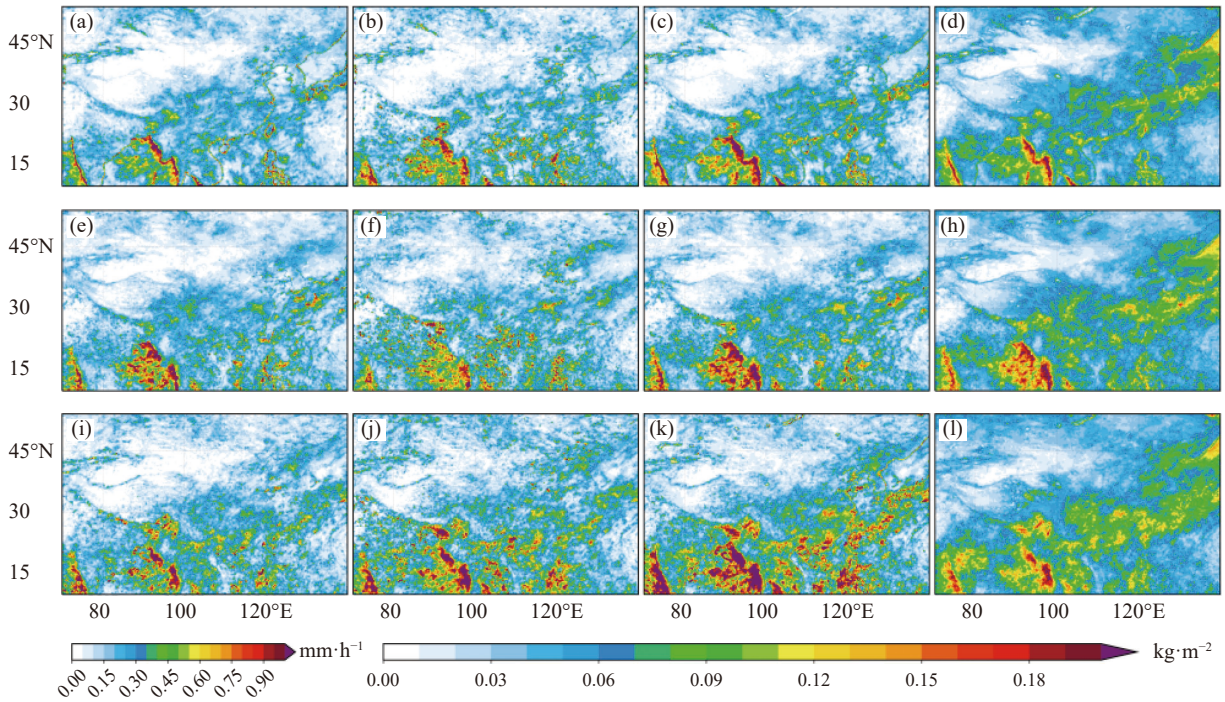


图 9 2024 年 5—7 月中国及周边地区 FY-3F 反演结果 (a—d)、FY-3G/MHP 产品 (e—h) 和 GPM/GPROF 产品 (i—l) 的地表降水率 (a、e、i)、冰水路径 (b、f、j)、雨水路径 (c、g、k) 和云液态水路径 (d、h、l) 的平均空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution maps of mean (a, e, i) SPR, (b, f, j) IWP, (c, g, k) RWP, and (d, h, l) CLWP for (a-d) FY-3F retrievals, (e-h) FY-3G/MHP product, and (i-l) GPM/GPROF product over China and adjacent regions from May to July in 2024

表 2 FY-3F 反演结果、FY-3G/MHP 及 GPM/GPROF 产品各参数均值、标准差及两两之间的空间分布相关系数

Table 2 Mean and standard deviation of key parameters for the proposed FY-3F retrievals, FY-3G/MHP, and GPM/GPROF products, along with the spatial distribution correlation coefficients between each two of them

反演参数	均值±标准差			相关系数		
	FY-3F反演结果	FY-3G/MHP	GPM/GPROF	FY-3F vs FY-3G/MHP	FY-3F vs GPM/GPROF	FY-3G/MHP vs GPM/GPROF
地表降水率	0.186±0.160 mm·h^{-1}	0.203±0.171 mm·h^{-1}	0.213±0.177 mm·h^{-1}	0.67	0.63	0.66
冰水路径	39.3±33.8 g·m^{-2}	44.7±34.6 g·m^{-2}	53.5±40.9 g·m^{-2}	0.60	0.63	0.61
雨水路径	43.4±36.4 g·m^{-2}	45.5±37.0 g·m^{-2}	60.9±51.1 g·m^{-2}	0.73	0.73	0.72
云液态水路径	53.9±29.1 g·m^{-2}	58.3±32.1 g·m^{-2}	61.2±30.2 g·m^{-2}	0.83	0.82	0.82

GPM/GPROF 均较 FY-3G/MHP 和 FY-3F 反演结果更高, 特别是雨水路径和冰水路径。从统计结果 (表 2) 来看, 各参量的均值与标准差也均呈现出由 GPM/GPROF 到 FY-3G/MHP 再到 FY-3F 反演结果依次递减的特征。而 FY-3F 反演结果虽在整体数值上略低于前两套产品, 但其与 FY-3G/MHP 的各项参数偏差均在 10% 左右, 这可能是由于二者采用了相近的算法和数据库所致。

需要说明的是, 本文这里做不同产品之间的对比主要用于评估反演结果之间的一致性及其物理合理性, 而非对反演精度进行严格判定。因为已有的研究结果很难明确究竟哪一种产品准确度更高。比如, Utsumi 等 (2020) 研究表明, GPM/GPROF 产品在水凝物反演中仍存在一定不确定性。同时, FY-3G/MHP 产品基于与 GPM/GPROF 类似的贝叶斯反演框架, 但在 Wu 等 (2026) 研究中表现出介于 GPROF 和 CMB 产品之间的中间特征, 在某些水凝物参数上可能具有更合理的分布特征。

3 结论与讨论

星载被动微波遥感技术有助于获得更加准确的多种水凝物及降水信息, 是更好地实现对强降水等极端天气监测及预警预报必不可少的重要观测手段。针对风云 3 号系列中的上午星 FY-3F 所搭载的新一代微波成像仪 MWRI-II 观测结果, 本文基于一套更加完整且准确的先验数据库, 构建贝叶斯算法实现对地表降水率和多种水凝物含量廓线的反演并进行算法验证及反演结果评估, 得到以下主要结论:

(1) 利用 GMI 的观测与反演产品, 结合 ERA5 再分析数据, 通过时空匹配获取了一套多参数融合数据集。随后利用一维变分技术对其中水凝物和地表发射率进行调整, 使之更接近真实情况。由此利用辐射传输模式, 构建了一套兼具完整性和准确性的先验数据库, 降低了随后贝叶斯反演的不确定性。

(2) 反演仿真验证的结果表明, 在海洋背景下各参数与参考值的相关系数均在 0.96 以上, 各种水凝物积分量的 RMSE 均小于 50 $g\cdot m^{-2}$, 平均偏差在个位数量级, 地表降水率的 RMSE 也仅有 0.5 $mm\cdot h^{-1}$。相比之下, 受陆地复杂地表发射率的影响, 陆面各参数的相关系数有所降低但仍均在 0.83 以上, 这体现出算法本身具有很好的准确性。

(3) 与 FY-3G 的 MHP 反演产品的个例比较表明, 无论是地表降水率, 或是各种水凝物廓线及积分量, 两种反演结果均显示出较高的一致性。而与 MHP 和 GPROF 产品的统计对比显示, 在 2024 年 5—7 月期间、覆盖中国及其周边地区的统计平均结果中三种反演结果的降水及相关水凝物路径的空间分布特征大体一致, 特别是液态水凝物。且与 MHP 产品相比, 各种反演量的偏差均在 10% 左右。

由于本文所提出的反演算法仅依赖 MWRI-II 观测结果, 而无需额外辅助数据的配合, 因此在未来能很好地通过工程化建设来实现业务化运行, 由此可实时提供地表降水率和多种水凝物廓线及积分量等多种云和降水参数。除用于灾害性天气的监测预警外, 亦能够为深入理解降水系统各种关键物理参数的时空分布提供重要数据支撑。特别是, 反演结果与 FY-3G 的 MHP 产品的一致性, 体现了算法的普适性, 这使得未来多颗其他采用 MWRI-II(如 FY-3H) 或 MWRI-RM 载荷的风云系列卫星反演产品的协同应用成为可能。另外, 需要指出的是, 本文建立在先验数据库基础上, 其完备性和代表性直接决定了反演结果的准确性, 对于极端降水过程, 由于发生概率低, 数据库中相关样本尚且不足, 进一步影响到算法对降水率及水凝物廓线的反演能力。未来研究中将重点补充极端降水样本, 进一步优化先验数据库。

参考文献 (References):

傅云飞.2019.卫星主被动仪器遥感中国暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):554−563. Fu Y F. 2019. Satellite-borne active and passive instruments for remote sensing of heavy rain in China: A review [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):554−563 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.0016

傅云飞.2021.洋面云液态水的星载被动微波仪器遥感反演研究进展[J].暴雨灾害,40(3):217−230. Fu Y F. 2021. Research progress on retrieval algorithms of cloud liquid water over ocean based on remote sensing by satellite-borne passive microwave instruments [J]. Torrential Rain and Disasters,40(3):217−230 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.03.001

康兆萍,周志敏,李红莉.2019.不同分辨率和云微物理方案对华中暴雨模拟的影响分析[J]. 暴雨灾害,38(6):658-667. Kang Z P, Zhou Z M, Li H L. 2019. Analysis on the effects of different horizontal resolutions and microphysical schemes on the simulation of a rainstorm in central China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(6):658-667 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.06.011

李洪兵,枚雪彬,夏羽.2024. IMERG 降水产品在 2021 年台风“烟花”降水过程的检验分析[J].暴雨灾害,43(1):73−83. Li H B, Mei X B, Xia Y. 2024. Verification and analysis of IMERG during the precipitation process of Typhoon In-Fa in 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(1):73−83 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−046

李书磊,刘磊,高太长,等.2017.基于多重查找表的太赫兹波段卷云微物理参数的反演方法[J].物理学报,66(5):054102. Li S L, Liu L, Gao T C, et al. 2017. Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables [J]. Acta Physica

Sinica,66(5):054102 (in Chinese). doi:10.7498/aps.66.054102

武胜利.2025.风云三号 (03 批) 气象卫星地面应用系统工程 F 星微波成像仪-II 型 L1 产品使用说明 (V1.1) [R].北京:国家卫星气象中心. Wu S L. 2025. Fengyun-3 (03 series) meteorological satellite ground application system project: F satellite Micro-Wave Radiation Imager-II (MWRI-II) L1 product user manual (V1.1) [R]. Beijing:China Meteorological Administration (in Chinese)

袁敏,李玫,闫美林,等.2023. GPM 卫星探测四川“5·21”特大暴雨的降水结构特征分析[J].高原山地气象研究,43(4):35−41. Yuan M, Li M, Yan M L, et al. 2023. Structural characteristics of ‘5·21’ heavy rainstorm in Sichuan detected by GPM satellite [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(4):35−41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.04.005

张萍萍,徐双柱,董良鹏,等.2020.一次极端短时强降水过程中 FY-3 微波湿度计观测特征分析[J]. 暴雨灾害,39(3):300-305. Zhang P P, Xu S Z, Dong L P, et al. 2020. Analysis of observation characteristic of FY-3 microwave hygrometer during an extreme short-term heavy precipitation process [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):300-305 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.03.011

Bauer P, Schluessel P. 1993. Rainfall, total water, ice water, and water vapor over sea from polarized microwave simulations and Special Sensor Microwave/Imager data [J]. Journal of Geophysical Research, 98(D11):20737−20759. doi:10.1029/93JD01577

Bennartz R, Bauer P. 2003. Sensitivity of microwave radiances at 85–183 GHz to precipitating ice particles [J]. Radio Science,38(4):8075. doi:10.1029/2002RS002626

Boukabara S A, Garrett K, Chen W, et al. 2011. MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,49(9):3249−3272. doi:10.1109/TGRS.2011.2158438

Chen H, Chandrasekar V, Cifelli R, et al. 2019. A machine learning system for precipitation estimation using satellite and ground radar network observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,58(2):982−994. doi:10.1109/TGRS.2019.2942280

Chen W X, Han Y, Weng F Z, et al. 2025. Physical and AI-based algorithms for retrieving cloud liquid water and total precipitable water from microwave observation [J]. Remote Sensing,17(4):728. doi:10.3390/rs17040728

Fu Y X, Zou C Z, Zhang P, et al. 2025. A climate data record of atmospheric moisture and sea surface temperature from satellite observations [J]. Earth System Science Data Discussions,17:4651−4670. doi:10.5194/essd−2024−608

GCOS. 2022. The 2022 GCOS Implementation Plan. (GCOS 244) [R]. Geneva: World Meteorological Organization: 98

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,146: 1999−2049. doi:10.1002/qj.3803

Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. 2014. The global precipitation measurement mission [J]. Bulletin of the American meteorological Society,95(5):701−722. doi:10.1175/BAMS−D−13−00164.1

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge:Cambridge University Press:3949. doi:10.1017/9781009157896

Kachi M, Shimada R, Ohara K, et al. 2023. The Advanced Microwave Scanning Radiometer 3 (AMSR3) onboard the Global Observing Satellite for Greenhouse Gases and Water Cycle (GOSAT-GW) toward long-term water cycle monitoring [C]// 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS),IEEE: 561-564. doi:10.1109/IGARSS52108.2023.10282052

Kidd C, Huffman G, Maggioni V, et al. 2021. The global satellite precipitation constellation: current status and future requirements [J]. Bulletin of the American meteorological Society,102(10):1−47. doi:10.1175/BAMS−D−20−0299.1

Kummerow C D, Randel D L, Kulie M, et al. 2015. The evolution of the Goddard Profiling algorithm to a fully parametric scheme [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,32(12):2265−2280. doi:10.1175/JTECH−D−15−0039.1

Kummerow C D, Ringerud S, Crook J, et al. 2011. An observationally generated a priori database for microwave rainfall retrievals [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,28(2):113−130. doi:10.1175/2010JTECHA1468.1

Levizzani V, Kidd C, Kirschbaum D B, et al. 2020. Satellite Precipitation Measurement: Volume 1 [M]. Cham:Springer,450

Liu G S. 1998. A fast and accurate model for microwave radiance calculations [J]. Journal Of The Meteorological Society Of Japan,76(2): 335−343. doi:10.2151/jmsj1965.76.2_335

Liu K, He J, Chen H. 2022. Precipitation retrieval from Fengyun-3D MWHTS and MWRI data using deep learning [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,15:7619−7630. doi:10.3390/rs14040848

Liu S, Wu B H, Zou C Z, et al. 2023. Highly consistent brightness temperature fundamental climate data record from SSM/I and SSMIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remoter Sensing,61:1−3. doi:10.1109/TGRS.2023.3316694

Manfred B, Stuart F, Patrick E, et al. 2018. Retrieval of an ice water path over the ocean from ISMAR and MARSS millimeter and submillimeter brightness temperatures [J]. Atmospheric Measurement Techniques,11(1):611−632. doi:10.5194/amt−11−611−2018

McFarlane, Sally A. 2002. A Bayesian algorithm for the retrieval of liquid water cloud properties from microwave radiometer and millimeter radar data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 107(D16)12-21. doi:10.1029/2001JD001011

Mo S Y, Zhao P G, Zhao C F, et al. 2024. Climatic precipitation efficiency and its dependence on environmental factors over the Sichuan Basin and adjacent regions, Southwest China [J]. Theoretical and Applied Climatology,155:3613−3629. doi:10.1007/s00704−024−048358

Rouzegari N, Bolboli Z M, Jimenez A C, et al. 2025. Passive microwave imagers, their applications, and benefits: a review [J]. Remote Sensing,17(9):1654. doi:10.3390/rs17091654

Spencer R W, Goodman H M, Hood R E. 1989. Precipitation retrieval

over land and ocean with the SSM/I: identification and characteristics of the scattering signal [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,6(2):254−273. doi:10.1175/1520−0426(1989)006<0254:PROLAO>2.0.CO;2

Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: a critical review [J]. Journal of Climate,18(2):237−273. doi:10.1175/JCLI−3243.1

Stephens G L, Kummerow C D. 2007. The remote sensing of clouds and precipitation from space: A review [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,64(11):3742−3765. doi:10.1175/2006JAS2375.1

Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The CloudSat mission and the A-Train: a new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. Bulletin of the American meteorological Society,83(12):1771−1790. doi:10.1175/BAMS−83−12−1771

Tang W B, Zhou J, Chen J. 2026. Triple collocation-based error evaluation of FY-3G MWRI-RM and FY-3F MWRI-II brightness temperatures [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,23:1−5. doi:10.1109/LGRS.2025.3649405

Utsumi N, Turk F J, Haddad Z S, et al. 2020. Evaluation of precipitation vertical profiles estimated by GPM-Era satellite-based passive microwave retrievals [J]. Journal of Hydrometeorology,22(1):95−112. doi:10.1175/JHM−D−20−0160.1

Wang Z, Weng F Z, Han Y, et al. 2024. Evaluations of microwave sounding instruments onboard FY-3F satellites for tropical cyclone monitoring [J]. Remote Sensing,16(23):4546. doi:10.3390/rs16234546

Weng F Z, Grody N C. 1994. Retrieval of cloud liquid water using the special sensor microwave imager (SSM/I) [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,99(D12):25535−25551. doi:10.1029/94JD02304

Wentz F J, Draper D. 2016. On-orbit absolute calibration of the Global Precipitation Measurement Microwave Imager [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,33:1393−1412. doi:10.1175/JTECH−D−15−0212.1

Wilheit T T, Chang A T C, Chiu L S. 1991. Retrieval of monthly rainfall indices from microwave radiometric measurements using probability distribution functions [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology,8(1):118−136. doi:10.1175/1520−0426(1991)0082.0.CO;2

Wu B H, Li X Q, Wang Y, et al. 2026. A prototype precipitation retrieval algorithm for passive microwave observations from the FY-3G satellite [J]. Journal of Remote Sensing,6:1057. doi:10.34133/remotesensing.1057

Wu B H, Wang Y, Zou C Z, et al. 2020. Afundamental climate data record derived from AMSR-E, MWRI, and AMSR2 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,58(8):5450-5461. doi:10.1109/TGRS.2020.2966055

Yang H, Weng F Z, Lv L Q, et al. 2011. The FengYun-3 microwave radiation imager on-orbit verification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,49(11):4552−4560. doi:10.1109/TGRS.2011.2148200

Yang J W, Jiang L M, Zheng Z J, et al. 2024. A new operational northern hemisphere snow water equivalent retrieval algorithm for FY-3F/MWRI-II based on pixel-based regression coefficients [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,62:1−15. doi:10.1109/TGRS.2024.3479452

Yin M T, Liu G S. 2017. Developing an a priori database for passive microwave snow water retrievals over ocean [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,122:12,960−12,981. doi:10.1002/2017JD027636

Zeng Z Q, Jiang G M, Jin Y Q. 2019. Intercalibration of FY-3C MWRI brightness temperature against GMI measurements based on Ocean Microwave Radiative Transfer Model [C]// 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS),IEEE: 8932-8935. doi:10.1109/IGARSS.2019.8898142

Zhang P, Gu S Y, Chen L, et al. 2023. FY-3G satellite instruments and precipitation products: first report of China's Fengyun Rainfall Mission In-Orbit [J]. Journal of Remote Sensing,3:0097. doi:10.34133/remotesensing.0097

Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, et al. 2019. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(9):1027−1045. doi:10.1007/s00376−019−8215−x

(责任编辑　闵爱荣)