

刘博凡,吴莹,邹依珂.射频干扰校正对星载微波资料反演降水的影响[J].海洋气象学报,2024,44(2):98-109.  
LIU Bofan, WU Ying, ZOU Yike. Impacts of radio frequency interference correction on retrieval of precipitation from spaceborne microwave data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(2): 98-109. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20221018003. (in Chinese)

## 射频干扰校正对星载微波资料反演降水的影响

刘博凡<sup>1,2,3,4</sup>, 吴莹<sup>1,2,5</sup>, 邹依珂<sup>1,2,6</sup>

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044;2.南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,江苏 南京 210044;3.南京信息工程大学雷丁学院,江苏 南京 210044;4.帝国理工学院地球科学与工程系,英国 伦敦 SW7 2AZ;5.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044;6.南京信息工程大学大气科学学院,江苏 南京 210044)

**摘要** 针对全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星上搭载的微波成像仪(GPM Microwave Imager, GMI),建立了陆面亮温数据的射频干扰(radio frequency interference, RFI)校正算法,同时提出了适用于GMI的综合指数雨强反演算法,即极化订正温度及散射指数(polarization corrected temperature-scattering index, PCT-SI)综合指数法,估算了2021年第6号强台风“烟花”登陆后,江苏及周边地区的雨强,与同时期双频降水测量雷达(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR)的近地面雨强产品进行对比分析,并比较了RFI校正前、后的近地面雨强反演精度。进而用强台风“梅花”和一次江淮气旋检验了该雨强反演算法的精度以及RFI校正算法对提高反演精度的有效性。结果表明,GMI的高频观测与降水强度大小密切相关,利用低频组合拟合89.00 GHz通道亮温获得大气散射指数,散射指数越大,雨强越大;RFI信号对微波资料反演近地面雨强的影响显著,所提出的校正方法可以有效地校正陆面上受RFI污染的GMI观测数据。研究结果有助于揭示微波传感器多通道亮温资料和降水强度之间的相关性,提高微波反演陆面降水的精度,并为陆面降水反演和预报提供参考。

**关键词** 射频干扰(RFI);近地面降水;PCT-SI综合指数法

中图分类号: P412.27 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)02-0098-12

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20221018003

## Impacts of radio frequency interference correction on retrieval of precipitation from spaceborne microwave data

LIU Bofan<sup>1,2,3,4</sup>, WU Ying<sup>1,2,5</sup>, ZOU Yike<sup>1,2,6</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. CMA Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Reading Academy, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Imperial College London, London SW7 2AZ, UK; 5. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 6. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2242212, 41975046); 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(202210300113Y, Reading2022003)

第一作者简介: 刘博凡,男,硕士研究生,主要从事大气、海洋探测与卫星遥感研究,bofan.liu@nuist.edu.cn。

通信作者简介: 吴莹,女,博士,副教授,主要从事大气探测与卫星遥感研究,wuying\_nuist@163.com。

**Abstract** For the Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI), the radio frequency interference (RFI) correction algorithm of the land-surface brightness temperatures is proposed, and the comprehensive index method of polarization corrected temperature-scattering index (PCT-SI) suitable for the GMI instrument is proposed. The rainfall intensity in Jiangsu and its surrounding areas after the landing of Typhoon In-fa (2106) is retrieved, and the retrieval data is compared with the detection data of Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) in the same period. And also, the retrieval accuracy of near-surface rainfall intensity before and after RFI correction is compared. Furthermore, the accuracy of the rainfall intensity retrieval algorithm and the effectiveness of the RFI correction algorithm in improving the retrieval accuracy are validated by application in Typhoon Muifa and a Jianghuai cyclone process. The results show that the high-frequency observation of GMI is closely related to the precipitation rate. The atmospheric scattering index is obtained by fitting the brightness temperature of 89.00 GHz channel with the low-frequency combination; the larger the scattering index, the greater the rainfall intensity. The RFI signal has a significant impact on the retrieval of near-surface rainfall intensity from microwave measurements, and the proposed correction method can effectively correct the GMI observation data contaminated by RFI on the land surface. The results are helpful to reveal the correlation between multi-channel brightness temperature data of microwave sensors and precipitation intensity, improve the accuracy of microwave retrieval of land-surface precipitation, and provide reference for retrieval and prediction of land-surface precipitation.

**Keywords** radio frequency interference (RFI); near-surface precipitation; comprehensive index method of PCT-SI

## 引言

降水量的获取和降水空间分布情况对于灾害性天气过程的监测起着至关重要的作用<sup>[1-4]</sup>。测量降水主要有3种方法:地面雨量计法、天气雷达探测法和气象卫星观测法<sup>[5]</sup>。地面雨量计测量降水最简单、最直接,天气雷达具有较高的测量精度<sup>[6]</sup>,但这两种常规探测手段受限于站点布设成本、布设疏密及站点维护等,只能观测有限的区域,且在海洋、无人区站点分布更加稀少<sup>[7-8]</sup>。卫星遥感能有效克服地面雨量计和天气雷达观测降水的不足,实现大范围的实时观测,特别是微波遥感可以穿透一定厚度的云层。星载微波辐射计可以接收到来自云雨大气内部微波辐射信号,因此越来越多的学者通过微波资料获得更多的降雨数据<sup>[9-14]</sup>。

微波反演降雨的方法主要有2种:物理算法和经验算法。物理算法包括 Wilheit 算法<sup>[15]</sup>、Wentz & Spencer 算法(简记为“W/S 算法”)<sup>[16]</sup>、GPROF 算法(Goddard profiling algorithm)<sup>[17-18]</sup>等。Wilheit 等<sup>[15]</sup>在研究海洋表面降水反演时,将大气分为多个薄层,对雨滴尺寸分布等提出大量假设,通过推导辐射传输方程建立单通道(19.35 GHz 通道)辐射亮温与降雨率的关系。W/S 算法<sup>[16]</sup>是美国航空航天局

应用于 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 微波辐射计业务化应用的海洋降水反演算法,该算法考虑了波束填充对降雨率低估的影响,基于云雨中液态水的透过率与观测亮温直接而唯一的关系到降水反演。GPROF 算法<sup>[17-18]</sup>起源于贝叶斯反演方法,该方法最初适用于降水反演,从先验廓线数据库中提取出表面降雨率和水凝物廓线,采用云分辨模型(cloud resolving model, CRM)模拟建立潜在云雨及其模拟亮温的数据库,提供降雨结构的物理完整描述以及特定的云结构。此后,GPROF 反演方案经历了多次修改。

经验算法中,典型的基于 SSM/I 微波辐射计数据的 CAL/VAL (Calibration/Validation) 算法<sup>[19]</sup>对陆地降水采用 85 GHz 单通道反演法;Spencer 等<sup>[20-21]</sup>先提出利用 37 GHz 和 85 GHz 两个不同极化通道的亮温差组合构成散射作用降雨反演算子,然后通过定义的极化订正温度(polarization corrected temperature, PCT)来检测水体表面在微波频段的弱辐射与因散射导致的低亮温。Grody<sup>[22]</sup>针对 SSM/I 数据,较早提出了散射指数作为降雨反演的算子反演地表降水的方法,其原理是在无散射的条件下,用低频亮温来拟合高频 85 GHz 亮温而建立一个关系,然后通过估计值与实际 85 GHz 亮温的差值得到由

于降雨粒子/冰晶粒子散射作用使得高频亮温减少的程度。Ferraro 等<sup>[23-24]</sup>使上述算法更加完善,利用散射指数对下垫面进行分类(海洋和陆地)研究降雨反演,取得了良好的效果。Liu 等<sup>[25]</sup>基于平面平行雨云的微波辐射传输模型的结果,并结合发射和散射状态,提出了利用 SSM/I 数据反演海洋和陆地降水量的算法。Li 等<sup>[26]</sup>利用复合微波指数(composite microwave index, CMI)方法,通过 SSM/I 数据反演了华东地区的夏季降水量,实例分析表明,该研究提出的决策树和 CMI 方法对华东地区的降雨识别和降雨强度反演是有效的。Prabhakara 等<sup>[27]</sup>基于热带降雨测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星上的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)和星载测雨雷达(Precipitation Radar, PR)观测资料反演了中尺度天气系统的降雨强度,该研究将中尺度雷暴系统分为发展期、成熟期、消亡期,根据 TMI 85 GHz 水平极化亮温和 PR 降雨强度建立一个降水背景场,然后基于 TMI 85 GHz 水平极化亮温判断降水的发生,并利用 TMI 85 GHz 水平极化亮温的空间梯度定义雷暴系统的发展阶段,同时利用 PR 观测降雨数据进行调和,建立了中尺度系统的平均面积内降雨强度反演算法。在上述研究的基础上,Zhao 等<sup>[28]</sup>的研究也表明,同时利用极化订正温度(PCT)和散射指数(scattering index, SI)可以更好地估计降水量。李万彪等<sup>[29]</sup>利用 TMI 观测亮温和淮河流域的地面天气雷达雨量资料,建立了以 SI 和 PCT 为主要参数的降水反演算法。

然而,目前广泛应用的星载微波辐射计,特别是低频观测通道,都受到地面不同程度的射频干扰(radio-frequency interference, RFI)<sup>[30-31]</sup>。例如, EOS/Aqua 卫星上的先进微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS, AMSR-E)、Coriolis 卫星上的 WindSat、风云三号(FY-3)卫星上的微波辐射成像仪(Microwave Radiation Imager, MWRI)、GCOM-W1 卫星上的先进微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer-2, AMSR-2),以及新一代全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星上的微波成像仪(GPM Microwave Imager, GMI)等。如果不能准确地检测到 RFI 信号,使用受污染的被动微

波辐射计观测资料获取地表和大气参数时,往往会产生较大的误差。

但有效检测到 GMI 数据中 RFI 信号<sup>[32]</sup>以后,并没有研究对受到 RFI 影响的数据进行订正算法的探讨,以及对提高降水反演精度进行讨论。针对此问题,本研究以江苏及周边地区为主要研究区域,针对 GMI 观测资料,提出对受到 RFI 影响的微波亮温数据进行校正的算法,并在此基础上,提出一种适用于 GMI 的极化订正温度及散射指数(polarization corrected temperature-scattering index, PCT-SI)综合指数法的降水强度反演法,进而反演 2021 年 6 号台风“烟花”登陆后江苏及周边地区的降雨强度;此外,通过与同时期双频降水雷达(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR)的近地表降水量产品进行对比,对 RFI 校正前后的近地表雨强反演结果进行分析,初步验证了微波亮温数据 RFI 校正对提高降水反演精度的必要性。研究结果有望进一步揭示微波传感器多通道资料和降水强度之间的相关性,提高微波反演陆面降雨的精度,为陆面降水反演和预报提供参考。

## 1 研究数据

与 TRMM 卫星上搭载的同类仪器相比, DPR 和 GMI 仪器作为 GPM 卫星上搭载的最核心、最重要的设备,则更为先进<sup>[33]</sup>。DPR 具有更高的精度和灵敏度, GMI 多 4 个高频通道,两者结合可以进一步改善和提高微量降水和固态降水的观测能力。

### 1.1 GPM/GMI 数据

本研究使用 GMI 的 L1B 亮温数据反演近地面降水量。GMI 的刈幅宽度为 885 km,远大于 DPR 的 Ka 和 Ku 幅宽,运行高度为 407 km,较 TMI 有更高的空间分辨率<sup>[34]</sup>。GMI 的频段范围为 10 GHz~183 GHz,具有 9 个频段,对应 13 个不同的微波通道,各通道的具体特征参数如表 1 所示。不同的频段都具有特定的探测优点。前 5 个低频段通道(通道 1—5)适合于探测各类液态降水,中间的 4 个中频段通道(通道 6—9)能够较好地捕捉到液态、固态混合降水,4 个高频段通道(通道 10—13)比较适合观测固态降水<sup>[2]</sup>。

### 1.2 GPM/DPR 数据

本研究使用的近地面降水量数据是 GPM/DPR

的2A Radar产品。GPM/DPR 主要包括 Ka 波段和 Ku 波段,对应的工作频率分别为 35.5 GHz 和 13.6 GHz,扫描宽度分别为 120 km 和 245 km<sup>[35]</sup>。

表 1 GMI 各通道主要技术性能指标<sup>[35]</sup>

Table 1 Main technical specifications of GMI channels<sup>[35]</sup>

通道号	中心频率/ GHz	极化方式	分辨率/ (km×km)
1—2	10.65	V/H	19.4×32.2
3—4	18.70	V/H	11.2×18.3
5	23.80	V	9.2×15.0
6—7	36.50	V/H	8.6×15.0
8—9	89.00	V/H	4.4×7.3
10—11	165.50	V/H	4.4×7.3
12	183.31±3	V	4.4×7.3
13	183.31±7	V	4.4×7.3

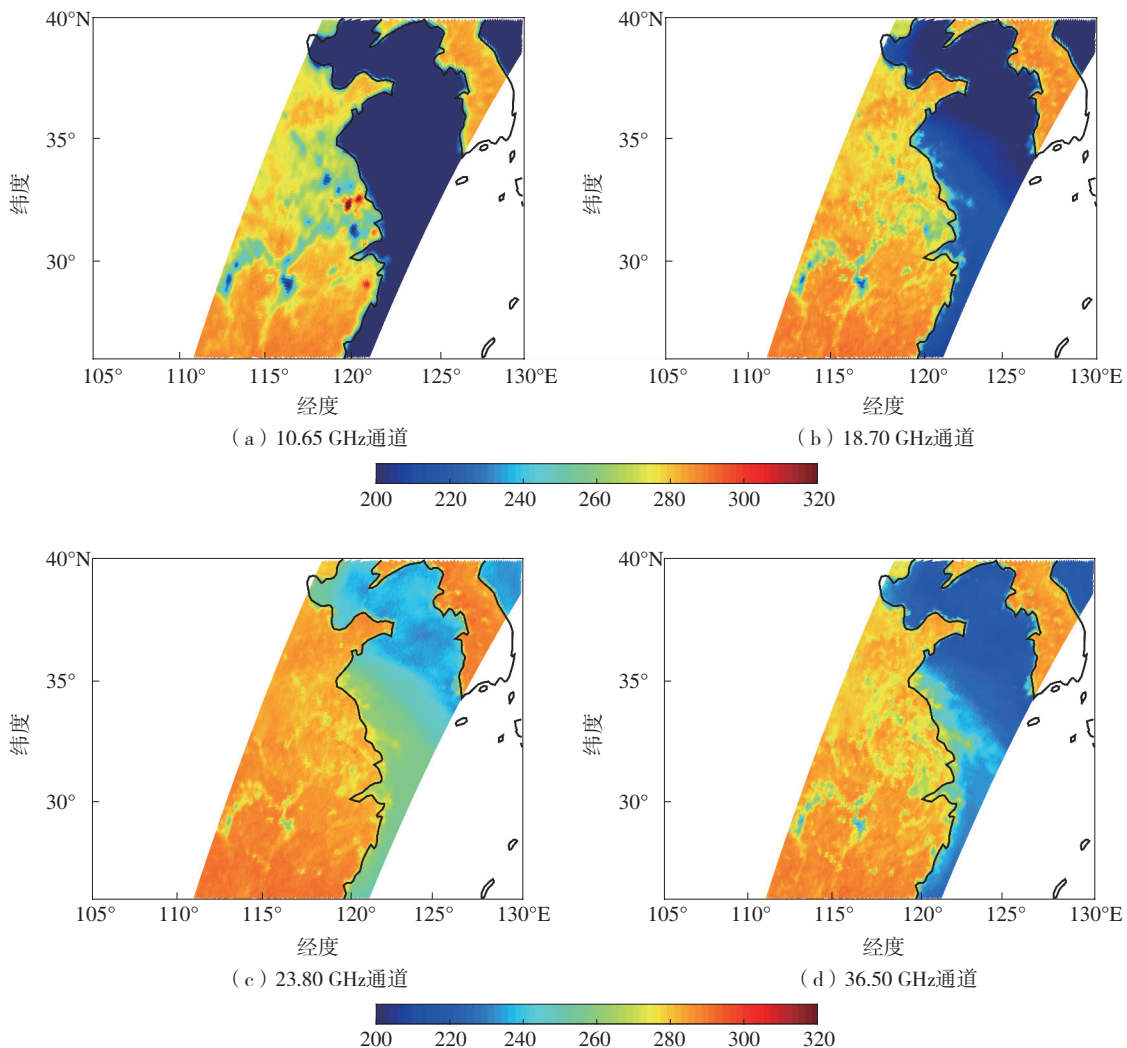
注:“H”表示水平极化,“V”表示垂直极化,下同。

### 1.3 数据选取

选取 2021 年中国十大天气气候事件之一的第 6

号强台风“烟花”作为微波降水反演研究对象。“烟花”移动缓慢,风雨强度大,影响范围广,在陆地上的时间也创下了纪录。“烟花”周边及副热带高压南侧偏东气流带动大量水汽进入中国内陆,是造成河南 7 月 20 日暴雨的原因之一。根据“烟花”的起编时间和停编时间,选取 2021 年 7 月 18—30 日的 GMI L1B 亮温和 2A Radar 降水数据,再根据 GPM 卫星扫描捕捉到比较完整的台风云系登陆后的成像情况,筛选出 2021 年 7 月 27 日 18:33(北京时,下同)的数据来分析此次台风降水个例。

由 2021 年 7 月 27 日“烟花”降水云系 GMI 垂直极化不同通道的亮温(图 1a—g)和同期 DPR 近地表降水强度分布情况(图 1h)可以看出,在相同经纬度范围之内,GMI 的幅宽比 DPR 的幅宽要大得多,探测的范围更广,因此 GMI 能观测到更为全面完整的台风云系形态,提供更多的台风降水资料。



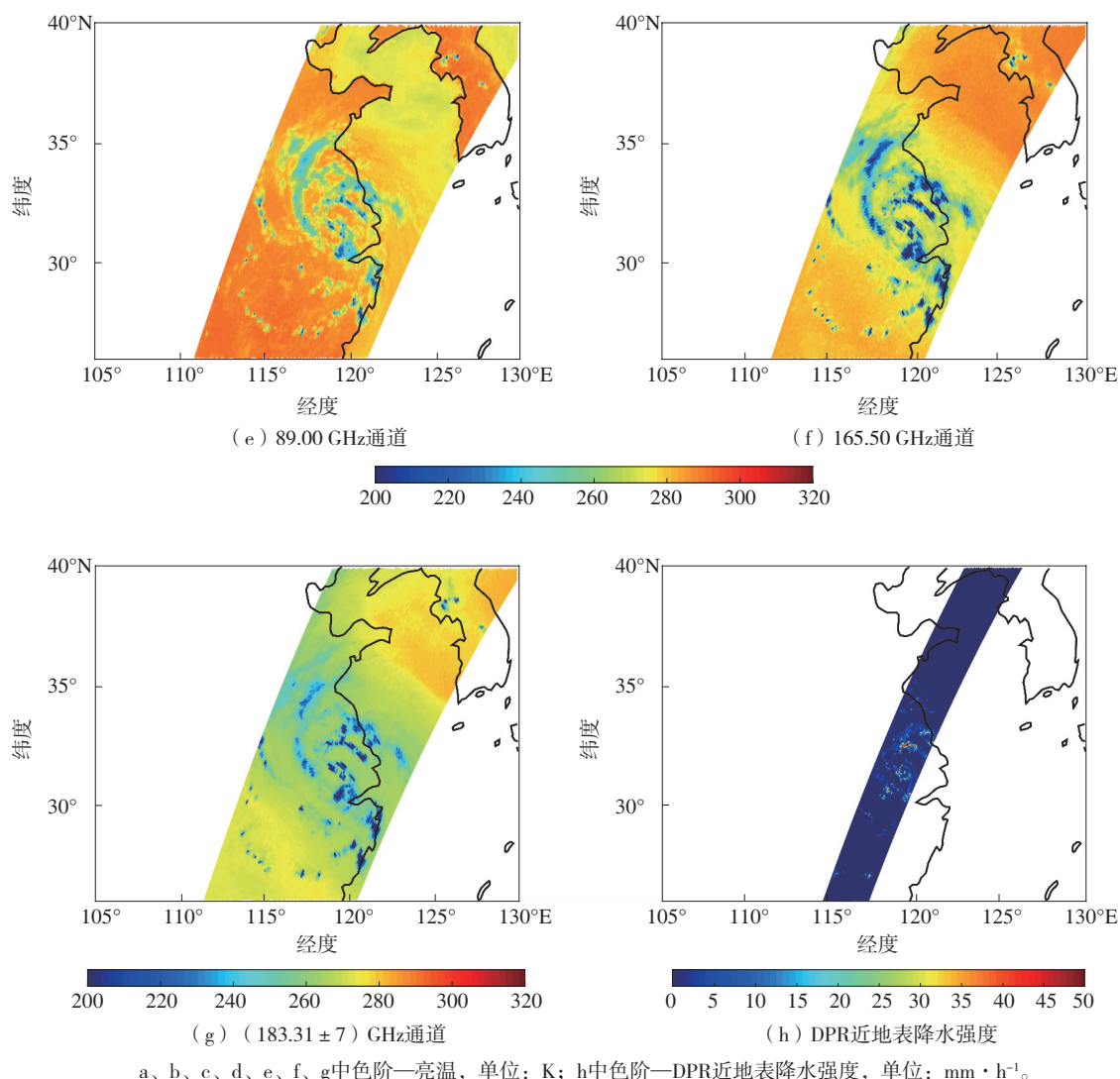


图1 2021年7月27日台风“烟花”降水云系 GMI 垂直极化通道的亮温和 DPR 近地表降水强度分布  
Fig.1 GMI brightness temperature and DPR near-surface precipitation intensity of Typhoon In-fa's precipitation cloud system in vertical polarization channels on 27 July 2021

2021年7月27日18:00,台风“烟花”的中心( $31.3^{\circ}\text{N}, 119.0^{\circ}\text{E}$ )位于江苏省南京市境内。由 GMI 的3幅中高频亮温图(图1e、f、g)均能看到非常明显的台风云系螺旋雨带,这些通道探测到的亮温低值区对应台风的螺旋雨带,且对应区域图1f的亮温比图1e更低。虽然 DPR 的探测范围比 GMI 小,但其在同一时期观测到的降水强度分布也呈现出明显的台风螺旋结构。由图1h可以看出,各个区域的降水强度分布并不均匀且差异较大,台风中心附近无降水,外围螺旋雨带存在着强降水,大范围区域的降水强度在  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以内,个别地区还出现了强降水,最大降水强度超过  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

## 2 研究方法

微波具有较为直接探测降水云系微物理特性的优势,通过 GMI 观测的亮温数据资料采用 PCT-SI 综合指数法进行降水反演计算。由于不同的微波辐射计在高度、入射角以及微波通道等方面都有差异,所以在利用实际资料时,需要重新考虑公式的适用性。因此,针对 GMI 的通道特性,提出了适用于该仪器的经验公式。

### 2.1 雨强反演算法的建立

GMI 亮温数据和 DPR 降水数据的空间分辨率不一致,且不同频率通道的亮温数据的空间分辨率

也并不完全相同,所以在组合各个通道亮温数据并建立雨强反演算子之前,需要进行数据预处理,即将 GMI 前 9 个通道的 L1B 微波亮温数据和 2A Radar 降水数据处理成  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的网格数据。

微波亮温在中高频段(图 1e—g)与近地表降雨强度之间存在一定的负相关,即高频段亮温分布中的低值区域往往对应实际降雨区,这些亮温低值在一定程度上与降水云的散射效应有关。在低频段,降水云的散射作用相对较弱,故在图 1a 的低频通道观测中几乎体现不出降水的空间分布,这表明低频段与近地表雨强的正相关性较低。因此,散射指数<sup>[20]</sup>避免了单独使用某个通道的较大误差,它通过在不同极化状态下结合多个通道的亮温来减少非降雨因素对降雨强度的影响。

GMI 的低频 10.65、18.70 和 23.80 GHz 通道垂直极化亮温不受冰晶散射的影响,可以通过晴空时低频通道的亮温组合来拟合易受降水粒子散射影响的 89.00 GHz 高频通道的亮温,从而得到 89.00 GHz 垂直极化通道的亮温估计值:

$$T_{B89V\_P} = 84.565 \ 1 - 0.059 \ 3T_{B10V} - 0.458 \ 8T_{B18V} + 1.219 \ 3T_{B23V} \quad (1)$$

其中: $T_b$ 表示通道亮温值,下标 V 表示垂直极化, $T_{B89V\_P}$ 表示 89.00 GHz 垂直极化亮温的估计值, $T_{B10V}$ 、 $T_{B18V}$ 和  $T_{B23V}$ 分别表示 10.65、18.70 和 23.80 GHz 通道的垂直极化亮温值,式(1)中的各个系数由多元线性回归得到。

针对陆面降雨反演,选择陆地范围作为研究区域,得到陆地表面的低频组合  $T_{B89V\_P}$ ,从而得出适用于陆面地表降水的大气散射指数( $I_s$ ):

$$I_s = T_{B89V\_P} - T_{B89V} \quad (2)$$

其中: $T_{B89V}$ 表示 89.00 GHz 垂直极化亮温, $I_s$ 可以反映降雨大气在 89.00 GHz 波段的辐射能量强度。

PCT-SI 综合指数法把 SI 和 89.00 GHz 的极化订正温度的组合作为反演算子,得到反演雨强  $R$  的算式为:

$$R = 40.149 \ 1 - 0.138 \ 1T_{B89\_PC} + 0.021 \ 1I_s \quad (3)$$

其中, $T_{B89\_PC}$ 是 89.00 GHz 的极化订正温度,算式为:

$$T_{B89\_PC} = 1.818T_{B89V} - 0.818T_{B89H} \quad (4)$$

其中, $T_{B89V}$ 和  $T_{B89H}$ 分别表示 89.00 GHz 垂直和水平极化亮温。然而,当存在 RFI 信号时,上述建立的 PCT-SI 综合指数法中各项系数会有一定偏差。因

此在构建 PCT-SI 综合指数之前需要检测 GMI 观测值是否受 RFI 影响,若有则需对受 RFI 信号污染的亮温数据进行校正。

## 2.2 RFI 校正算法的建立

一般而言,土壤的介电常数受水分含量影响,故其介电常数随频率的升高而增大,从而使得微波低频通道的亮温值与频率呈正相关关系。但当某通道受到 RFI 污染时则会产生负谱差梯度<sup>[36]</sup>,即低频率通道的 RFI 最可能导致负频谱梯度的产生。对于 RFI 的识别,国内外学者提出了一系列检测方法<sup>[37]</sup>。

由于 Li 等<sup>[36]</sup>提出的谱差法对陆面 RFI 信号强度和范围的检测最为直接且有效,因此本研究采用谱差法对 RFI 进行分析。据此,用 RFI 指数来判断 RFI 的存在和强度。10.65 GHz 通道的 RFI 指数<sup>[38]</sup>为:

$$I_{RFI\_10H} = T_{B10H} - T_{B18H} \quad (5)$$

$$I_{RFI\_10V} = T_{B10V} - T_{B18V} \quad (6)$$

其中: $I_{RFI}$ 表示 RFI 指数,下标 10 和 18 分别表示 10.65 GHz 和 18.70 GHz 通道,下标 V 和 H 分别表示垂直极化和水平极化, $T_b$ 表示观测的亮温值。当  $I_{RFI} \leq 5$  K 时,RFI 强度较弱;当  $5 \text{ K} < I_{RFI} < 10$  K 时,RFI 强度中等;当  $I_{RFI} \geq 10$  K 时,则意味着强 RFI。

根据 GMI 各通道亮温观测值之间的相关性,可以用受干扰通道以外的其他通道亮温值来估算受干扰通道的亮温值。由于 89.00 GHz 通道易受大气中降水粒子散射作用的影响,因此仅使用 GMI 的 18.70、23.80 和 36.50 GHz 通道的亮温来估算 10.65 GHz 通道亮温。在无 RFI 信号条件下,得到 10.65 GHz 垂直极化通道的亮温值和其他几个通道亮温观测值之间的关系式:

$$T_{B10V\_P} = 11.174 \ 6 + 0.658 \ 9T_{B18V} + 0.944 \ 6T_{B18H} - 0.450 \ 6T_{B23V} + 0.751 \ 5T_{B36V} - 0.949 \ 9T_{B36H} \quad (7)$$

其中  $T_{B36V}$ 、 $T_{B36H}$  分别表示 36.50 GHz 垂直、水平极化亮温。即当用公式(6)检测出 RFI 信号后,进而用公式(7)来校正受 RFI 影响的 10.65 GHz 垂直极化通道的亮温值,从而得到 RFI 校正后的 89.00 GHz 垂直极化亮温的估计值:

$$T_{B89V\_P}(RFI) = 75.599 \ 9 + 0.260 \ 9T_{B10V\_P} - 1.004 \ 4T_{B18V} + 1.478T_{B23V} \quad (8)$$

RFI 校正后的大气散射指数为:

$$I_s(RFI) = T_{B89V\_P}(RFI) - T_{B89V} \quad (9)$$

RFI 校正后的雨强反演算式为:

$$R(\text{RFI}) = 43.994 - 0.151 4T_{\text{B89\_PC}} + 0.034 9I_{\text{S}}(\text{RFI}). \quad (10)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 RFI 信号检测

利用公式(5)—(6)的谱差法,检测研究范围内的 RFI 信号。图2是2021年7月22、24和27日 GMI

10.65 GHz 水平和垂直通道的 RFI 信号分布。水平极化通道的 RFI 信号比同期垂直通道的 RFI 信号强度更大,分布范围更广。而且 RFI 信号的日强度分布和范围分布并不完全一样,这和地面微波主动发射器信号发射方向与卫星传感器观测方向的相对位置有关。对于台风这种日变化特征明显的研究对象,本身云系特征的变化可能也是一个原因。

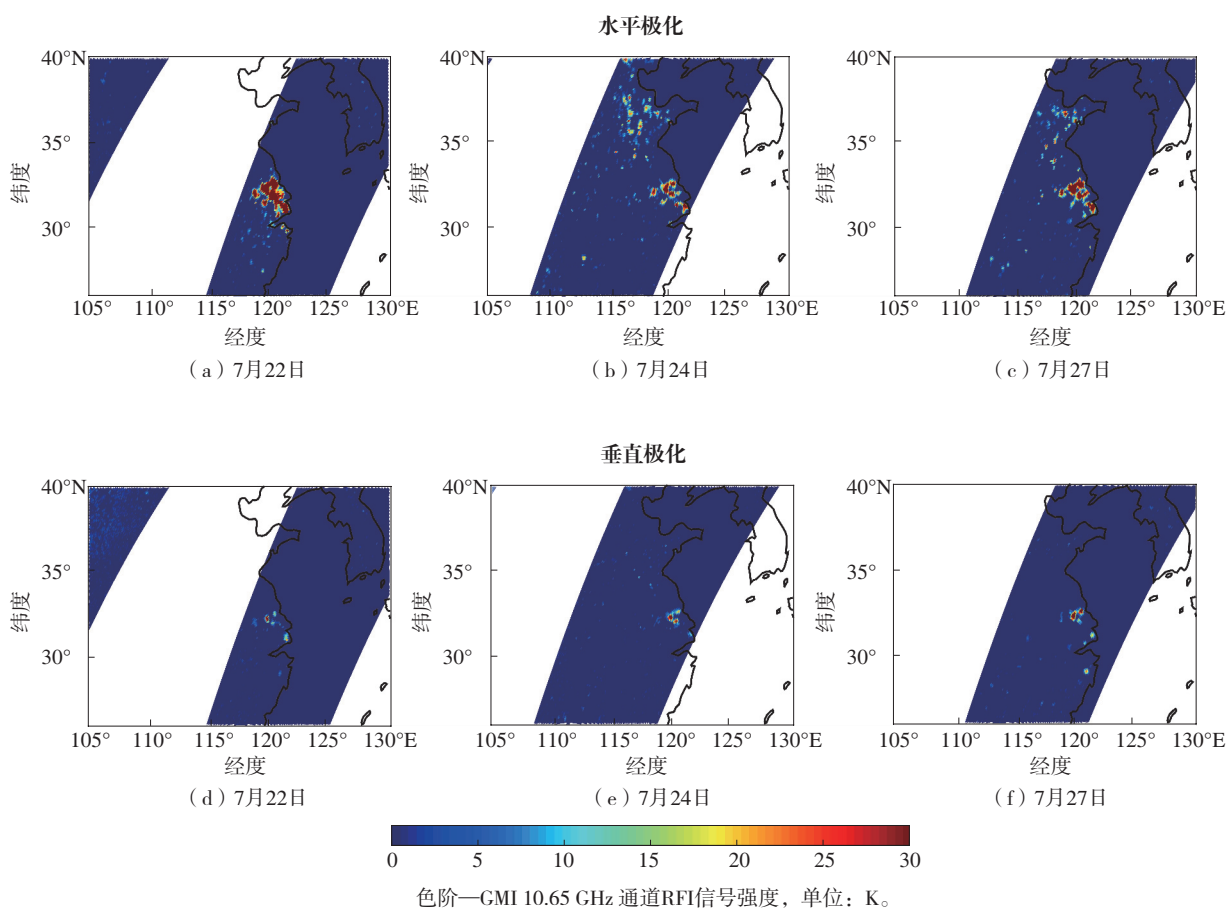


图2 2021年7月 GMI 10.65 GHz 通道 RFI 信号强度分布  
Fig.2 Distribution of RFI signal strength of GMI 10.65 GHz channel in July 2021

#### 3.2 RFI 信号校正

利用公式(7)校正 10.65 GHz 垂直极化通道受 RFI 信号污染的亮温数据,得到校正以后的亮温和 RFI 值。RFI 校正前,GMI 10.65 GHz 垂直通道的亮温高值区域主要出现在 RFI 信号存在的地方,主要分布在江苏和浙江部分地区,表现为明显高于周边地区的红色孤立区域(图 1a),对应 RFI 信号(图 2f)。经公式(7)的算法校正以后,异常的亮温高值区域被趋于正常的亮温分布取代(图 3a),RFI 信号的强度也大大减弱(图 3b)。

#### 3.3 PCT-SI 综合指数法反演陆面雨强

利用公式(3)和公式(10)分别估算 RFI 校正前后的雨强。为了检验 RFI 校正算法的效果,分别绘制 RFI 校正前后反演雨强与 DPR 所测雨强的散点图(图 4)。RFI 校正前,平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为  $3.293 9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,均方根误差(root mean square error, RMSE)为  $7.866 9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。经 RFI 校正后,MAE 为  $3.205 7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,RMSE 为  $7.789 8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。RFI 校正前后,反演的雨强误差略有改善,这可能由于台风云系本身日变化特征明显,从而加大反演结

果的误差。相较于 TMI 的不同雨强反演算法和 DPR 雷达观测结果的 MAE ( $-14.495 \sim 2.457 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 和 RMSE ( $2.140 \sim 15.908 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 本研究的综合指数算法处于中等水平<sup>[39]</sup>。产生误差的原因是微波亮温

会随着降雨云内部和地表的不确定性而变化, 因而各通道的微波观测不能完全表征降雨强度。另外, GMI 和 DPR 虽然在时间上匹配良好, 但在空间分辨率上存在一定的差异。

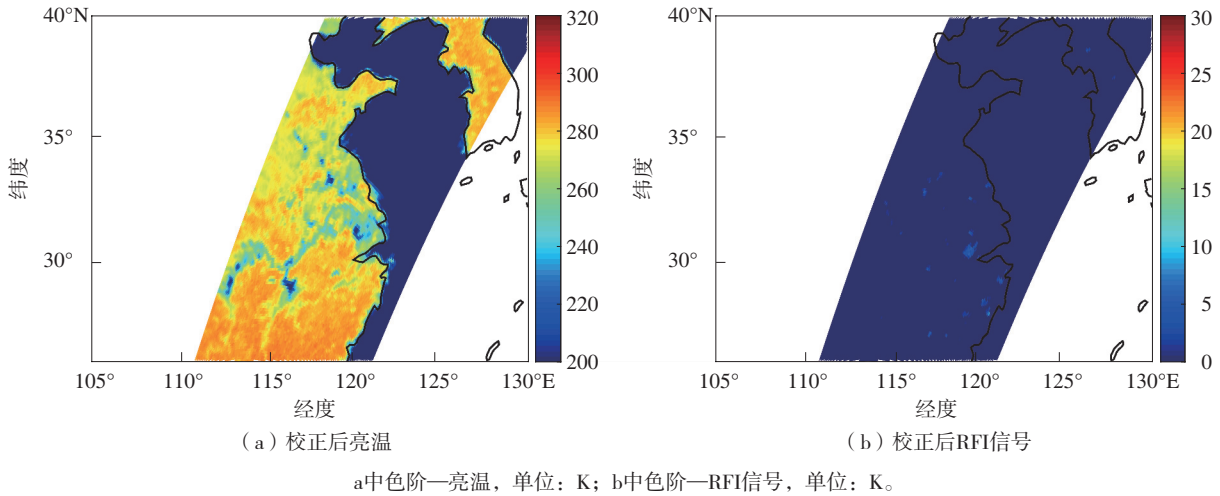


图 3 2021 年 7 月 27 日 RFI 校正后 GMI 10.65 GHz 垂直通道亮温和 RFI 信号分布  
Fig.3 Distribution of brightness temperature in GMI 10.65 GHz vertical channel and RFI signal after RFI correction on 27 July 2021

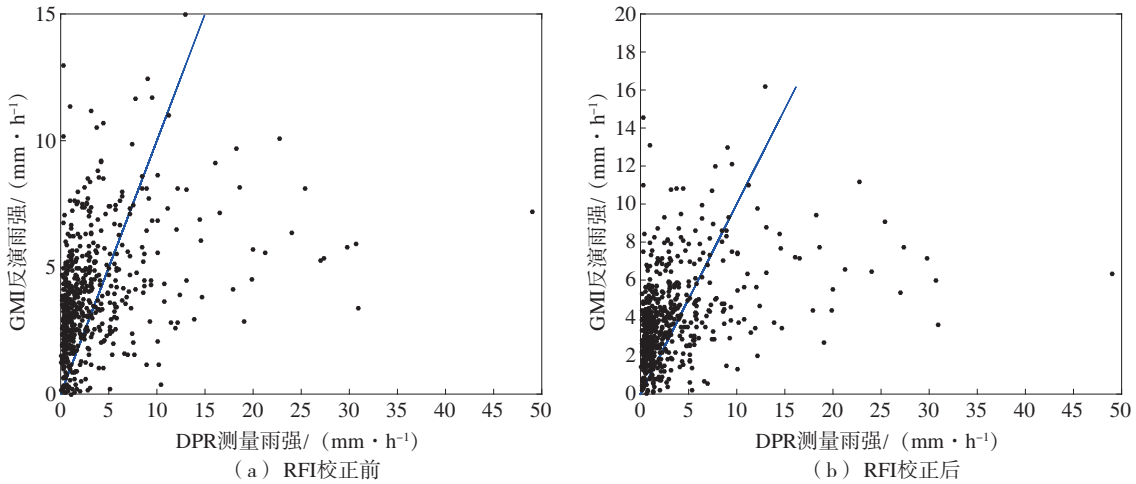


图 4 GMI 反演雨强与 DPR 测量雨强之间的关系  
Fig.4 Relationship between GMI retrieval and DPR measurement of rainfall intensity

图 5 是江苏及周边地区 2021 年 7 月 27 日 18:33 的雨强分布。其中, 图 5a 是由 DPR 观测资料得到的近地面雨强, 图 5b 是利用 GMI 资料根据公式 (10) 经 RFI 校正以后反演得到的近地面雨强, 图 5c 是用 GMI 亮温资料反演的和 DPR 覆盖范围 (图 5a) 相同的近地面雨强。需要注意的是, 本研究以陆地为研究区域, 因而图 5b 仅展示陆地范围, 而图 5c 中洋面的雨强反演结果并不可靠。可以看出, 降

雨范围基本一致。由于 GMI 较 DPR 有更广的观测范围, 由 GMI 资料反演的降雨范围较 DPR 资料反演的稍大, 但降水中心的降水强度明显偏小, 反演结果整体也偏小。

而且, 由于台风的日变化特征明显, 其本身云系特征的变化可能也是增加反演结果误差的一个原因。此外, RFI 校正前后反演的雨强误差差别不大, 很大程度上因为有 RFI 信号分布的区域占整个研究



区域的范围不大。

2022年第12号强台风“梅花”于2022年9月14日在浙江温岭到舟山一带沿海地区登陆后,2A Radar雨强产品(图6a)和GMI亮温资料反演的地面雨强(图6b)的空间分布如图所示。对比分析

可见,和之前“烟花”的分析结果类似,即GMI反演的降雨率范围较2A Radar雨强产品的降雨范围稍大,但降水强度明显偏小。同样需要注意的是,由于本研究建立反演模型前选用的是陆表样本,因而图6b中洋面区域的雨强反演结果并不可靠。

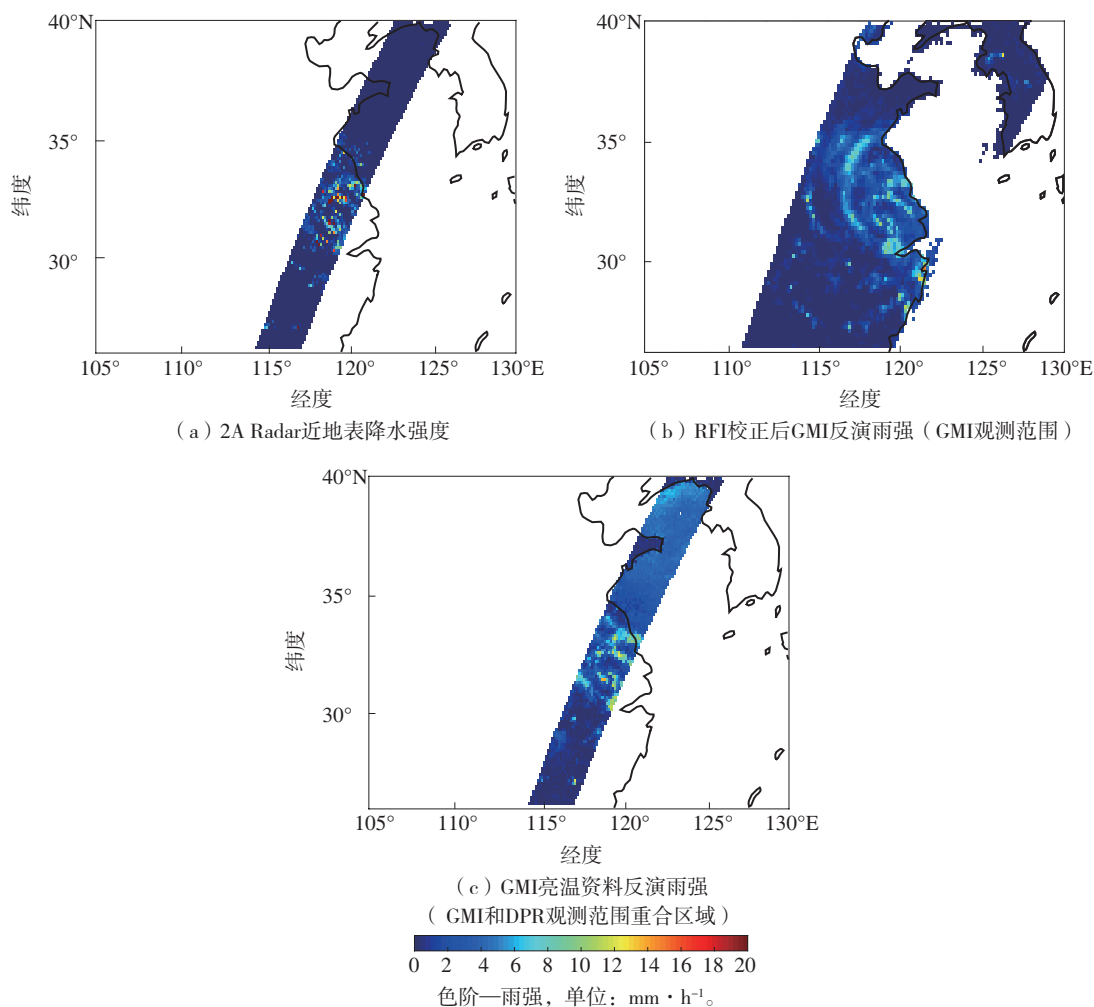


图5 2021年7月27日雨强分布  
Fig.5 Distribution of rainfall intensity on 27 July 2021

为了进一步检验PCT-SI综合指数法反演降水强度的效果,再以受江淮气旋影响产生的一次强降水为例。受江淮气旋影响,2023年4月2日该研究区域出现显著降水过程,雨强为中雨到大雨。该降水过程中,利用本研究建立的综合指数反演法,使用由GMI亮温数据得到的反演结果和GPM的2B Combined(双频雷达和微波辐射计组合反演)二级产品进行对比。原则上,2B Combined产品提供了可以从星载平台实现的地表降雨量和降水垂直分布的最准确、高分辨率估计。将89.00 GHz的极化订正温度和经RFI校正后

的大气散射指数 $I_s$ 的值代入反演公式(10)得出反演雨强的分布(图7a),与2B Combined资料的结果(图7b)降雨分布范围基本一致,略微偏大,该研究区域中心的反演雨强强度偏小,明显低于2B Combined产品雨强。将反演雨强与2B Combined产品进行相关性分析,二者之间的相关系数为0.622 2,反演效果较好,反演结果的MAE为 $2.033 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (RFI校正前为 $2.107 2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),RMSE为 $2.225 4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (RFI校正前为 $2.300 0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),说明RFI校正算法对PCT-SI综合指数雨强反演算法的精度有一定程度的改善。

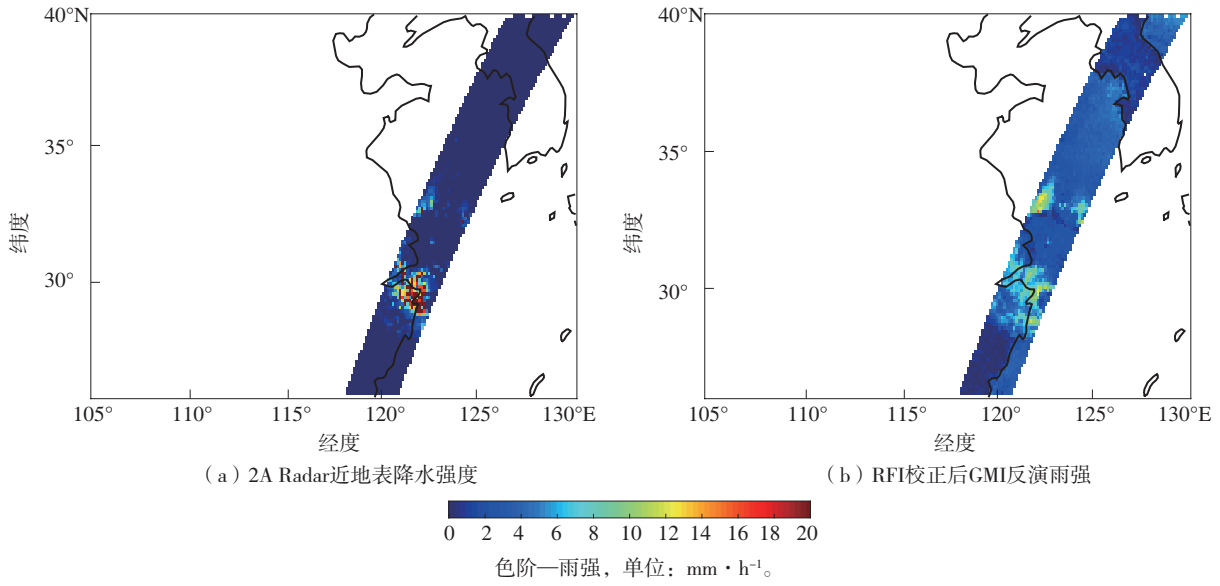


图 6 2022 年 9 月 14 日雨强分布  
Fig.6 Distribution of rainfall intensity on 14 September 2022

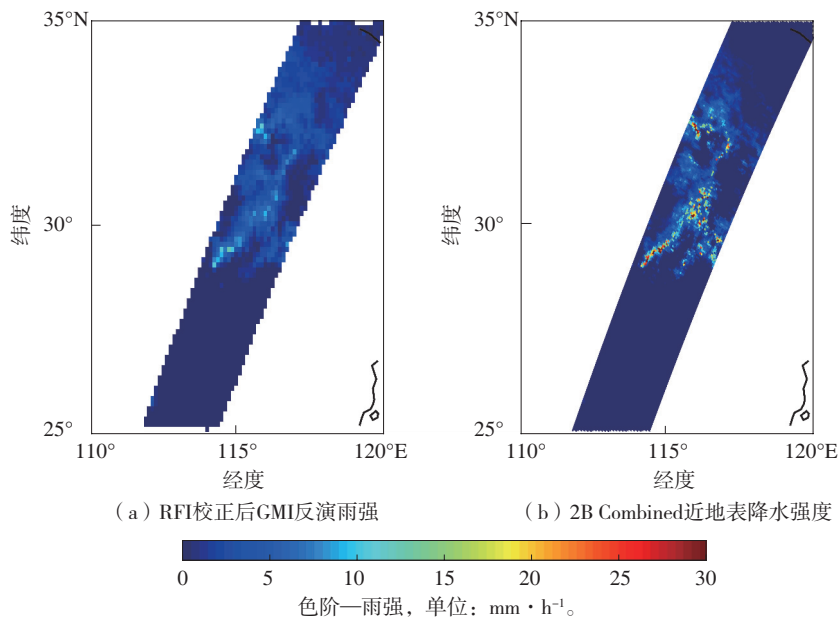


图 7 2023 年 4 月 2 日雨强分布  
Fig.7 Distribution of rainfall intensity on 2 April 2023

#### 4 结论

选用 2021 年强台风“烟花”个例,对 GMI 资料进行分析,建立了 GMI 低频通道资料的 RFI 校正算法,提出了适用于 GMI 的极化订正温度及散射指数 (PCT-SI) 综合指数反演降水方法,反演了“烟花”登陆后江苏及周边地区的雨强,与同时期 DPR 的雨强探测资料进行对比。接着,用该算法反演了强台风

“梅花”和一次江淮气旋期间的降水强度,并进一步分析了 RFI 校正前、后近地面雨强的 GMI 反演结果,检验了 RFI 校正算法对提高雨强反演精度的有效性。得到以下结论:

(1)通过对陆面的 RFI 校正以后,利用 GMI 资料反演陆面降水的精度得到了一定程度的提高,从侧面验证了微波资料在使用之前进行 RFI 检测和校正的必要性。

(2)不同频率的微波亮温能在一定程度上反映降雨区域的分布情况。由于 GMI 的扫描幅宽比 DPR 的扫描幅宽更大,故 GMI 资料反演的降雨范围较 DPR 资料反演的范围更广。GMI 资料反演的雨强和 DPR 资料反演的雨强基本吻合,但降水中心的降水强度偏小,反演结果整体上也偏小。

(3)PCT-SI 综合指数法对江苏及周边地区的降水反演效果较好。但通过对研究区域 GMI 各通道亮温分布的分析,还可进一步改进该算法。如本研究中采用的方法没有考虑到 GMI 高频通道(183 GHz 附近)亮温的影响,若考虑散射因子的同时加入吸收因子将会对雨强估算公式有一定的改善。

此外,GMI 降水反演不可避免地存在一定的误差,同一降水个例可能在不同时次的反演趋势和效果不完全相同。本研究把 2A Radar 和 2B Combined 降水产品作为检验 GMI 降水反演效果的“真值”,在今后的工作中,可以随机选取多个不同地区的降水个例,以及选用地面台站观测数据作为“真值”,进一步验证本研究提出的算法。

### 参考文献:

- [1] KIDD C, HUFFMAN G. Global precipitation measurement [J]. *Meteor Appl*,2011,18(3):334-353.
- [2] 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.
- [3] MAGGIONI V, MEYERS P C, ROBINSON M D. A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the tropical rainfall measuring mission (TRMM) era [J]. *J Hydrometeorol*, 2016, 17(4):1101-1117.
- [4] 赵海军,曹洁,潘玲,等.2007—2019年山东省短时强降雨时空分布特征[J].*海洋气象学报*,2021,41(2):149-155.
- [5] LI Z, YANG D W, GAO B, et al. Multiscale hydrologic applications of the latest satellite precipitation products in the Yangtze River Basin using a distributed hydrologic model[J]. *J Hydrometeorol*,2015,16(1):407-426.
- [6] 李芳,李南,万瑜.台风“温比亚”影响山东期间 GPM 资料的降水分析[J].*海洋气象学报*,2020,40(4):69-76.
- [7] XU Z X, LIU Z F, FU G B, et al. Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River Basin during the past 50 years [J]. *J Arid Environ*,2010,74(2):256-267.
- [8] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].*水科学进展*,2013,24(4):490-496.
- [9] 谷松岩,卢乃锰,吴琼,等.FY-3 气象卫星降水探测能力分析与发展[J].*海洋气象学报*,2022,42(2):1-10.
- [10] 何文英,陈洪滨,周毓筌.微波被动遥感陆面降水统计反演算式的比较[J].*遥感技术与应用*,2005,20(2):221-227.
- [11] 王小兰.使用物理方法由 TRMM/TMI 亮温资料反演中国陆地降水[D].北京:中国气象科学研究院,2009.
- [12] 李相虎,张奇,邵敏.基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J].*地理科学进展*,2012,31(9):1164-1170.
- [13] 钱博,曾智华,徐菊艳,等.一套基于 FY-3B/MWRI 观测的热带气旋微波亮温数据集[J].*海洋气象学报*,2022,42(1):92-100.
- [14] 郎姝燕,孙从容,鲁云飞,等.中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用[J].*海洋气象学报*,2022,42(2):74-80.
- [15] WILHEIT T T, CHANG A T C, RAO M S V, et al. A satellite technique for quantitatively mapping rainfall rates over the oceans [J]. *J Appl Meteor*,1977,16(5):551-560.
- [16] WENTZ F J, SPENCER R W. SSM/I rain retrievals within an unified all-weather ocean algorithm[J]. *J Atmos Sci*,1998,55(9):1613-1627.
- [17] KUMMEROW C, OLSON W S, GIGLIO L. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*,1996,34(5):1213-1232.
- [18] KUMMEROW C, HONG Y, OLSON W S, et al. The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors [J]. *J Appl Meteor*,2001,40(11):1801-1820.
- [19] BERG W, OLSON W, FERRARO R, et al. An assessment of the first- and second-generation navy operational precipitation retrieval algorithms[J]. *J Atmos Sci*,1998,55(9):1558-1575.
- [20] SPENCER R W. A satellite passive 37-GHz scattering-based method for measuring oceanic rain rates [J]. *J Climate Appl Meteor*,1986,25(6):754-766.
- [21] SPENCER R W, GOODMAN H M, HOOD R E. Precipitation retrieval over land and ocean with the

- SSM/I: identification and characteristics of the scattering signal[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1989, 6(2): 254-273.
- [22] GRODY N C. Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave imager [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 1991, 96(D4): 7423-7435.
- [23] FERRARO R R, GRODY N C, MARKS G F. Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I[J]. *Remote Sens Rev*, 1994, 11(1/2/3/4): 195-209.
- [24] FERRARO R R, SMITH E A, BERG W, et al. A screening methodology for passive microwave precipitation retrieval algorithms[J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(9): 1583-1600.
- [25] LIU G S, CURRY J A. Retrieval of precipitation from satellite microwave measurement using both emission and scattering[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 1992, 97(D9): 9959-9974.
- [26] LI L, ZHU Y J, ZHAO B L. Rainfall retrieval over land from satellite remote sensing (SSM/I) [J]. *Chin Sci Bull*, 1998, 43(22): 1913-1917.
- [27] PRABHAKARA C, IACOVAZZI R JR, WEINMAN J A, et al. A TRMM microwave radiometer rain rate estimation method with convective and stratiform discrimination[J]. *J Meteor Soc Japan*, 2000, 78(3): 241-258.
- [28] ZHAO B L, YAO Z Y, LI W B, et al. Rainfall retrieval and flooding monitoring in China using TRMM Microwave Imager (TMI) [J]. *J Meteor Soc Japan*, 2001, 79(1B): 301-315.
- [29] 李万彪, 陈勇, 朱元竞, 等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水[J]. *气象学报*, 2001, 59(5): 591-601.
- [30] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(6): 814-842.
- [31] 吴莹, 钱博, 王振会. 被动微波遥感观测资料干扰对地表参数反演的影响分析[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 176-181.
- [32] DRAPER D W. Terrestrial and space-based RFI observed by the GPM microwave imager (GMI) within NTIA semi-protected passive earth exploration bands at 10.65 and 18.7 GHz [C]//2016 Radio Frequency Interference (RFI). Socorro: IEEE, 2016: 26-30.
- [33] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The global precipitation measurement mission[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2014, 95(5): 701-722.
- [34] 卢美圻, 魏鸣. GPM 资料在分析“彩虹”台风降水垂直结构中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(5): 904-912.
- [35] 余占猷. 利用 DPR 和 GMI 探测结果对东亚降水云的个例分析研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [36] LI L, NJOKU E G, IM E, et al. A preliminary survey of radio-frequency interference over the U. S. in Aqua AMSR-E data [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42(2): 380-390.
- [37] 吴莹, 姜苏麟, 钱博, 等. 星载微波资料频率干扰信号识别研究综述[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(5): 1944-1952.
- [38] WU Y, WENG F Z. Detection and correction of AMSR-E radio-frequency interference [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 25(5): 669-681.
- [39] 闵爱荣, 游然, 卢乃锰, 等. TRMM 卫星微波成像仪资料的陆面降水反演[J]. *热带气象学报*, 2008, 24(3): 265-272.