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 Hongbing, MEI Xuebin, XIA Yu.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

IMERG降水产品在2021年台风“烟花”降水过程的检验分析

李洪兵[1],枚雪彬[2],夏羽[3]

(1. 重庆市綦江区气象局,綦江 401420;2. 湖北省宜昌市气象局,宜昌 443000;3. 武汉中心气象台,武汉 430074)

摘　要:为研究多卫星联合反演(Integrated Multisatellite Retrievals for GPM,IMERG)降水产品对台风降水的适用性,以2021年台风“烟花”为例,利用我国东部地区563个国家气象站小时降水资料、FY-4A AGRI红外亮温资料和全球测雨卫星双频测雨雷达(GPM DPR)资料,检验IMERG估测降水的能力,并分析误差形成的原因。结果表明:IMERG估测降水与实况相比空间一致性较好,相关系数达0.75。IMERG降水产品整体表现出一致的低估,但不同雨强表现不同,随着降水强度增大,其低估程度随之增大。IMERG降水产品对弱降水存在略高估。对于10 mm·h^{-1}以下的降水,IMERG估测值略大于实测值;对于40 mm·h^{-1}以上的强降水,IMERG估测值明显小于实测值。由最小二乘法计算的IMERG估测值和实测值计算的直线处于对角线下方可知,整体而言IMERG估测值小于实测值。IMERG融合降水产品中红外反演降水的误差比微波反演的更大,小时降水量的均方根误差为7.8 mm,并且忽略了台风“烟花”中的暖云降水。微波反演不同类型降水的精度存在差异,对粒子数浓度参数(dBN$_w$)和粒子有效半径(D_0)较为集中的层状降水反演效果优于dBN$_w$和D_0较为分散的对流降水。红外和微波反演的强降水均比实况偏小,导致IMERG估测降水值亦偏小。

关键词:台风“烟花”;GPM IMERG;降水检验;FY-4A AGRI;降水粒子谱

中图法分类号:P414　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.12406/byzh.2023-046

Verification and analysis of IMERG during the precipitation process of Typhoon In-Fa in 2021

LI Hongbing[1], MEI Xuebin[2], XIA Yu[3]

(1. *Qijiang Meteorological Office of Chongqing, Qijiang* 401420; 2. *Yichang Meteorological Office of Hubei Province, Yichang* 443000; 3. *Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan* 430074)

Abstract: To study the applicability of the Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) precipitation products to typhoon precipitation, taking Typhoon In-Fa in 2021 as an example, this paper evaluates the IMERG precipitation estimation capabilities and the cause of errors using hourly precipitation data from 563 national meteorological stations in the eastern region of China, FY-4A AGRI infrared brightness temperature data, and Global Precipitation Measurement Dual-Frequency Precipitation Radar (GPM DPR) data. The results indicate that IMERG precipitation estimation shows good spatial consistency compared to observations, with a correlation coefficient of 0.75. IMERG precipitation products exhibit an overall consistent underestimation, the performance varies with different precipitation intensities, As precipitation intensity increases, the degree of underestimation also grows. IMERG products slightly overestimate weak precipitation. For precipitation below 10 mm·h^{-1}, IMERG estimations are slightly larger than the observations, but for precipitation above 40 mm·h^{-1}, IMERG estimations are significantly smaller than the observations. However, an overall underestimation of the IMERG products can be indicated that the line was below the diagonal, which calculated by the least square method between the IMERG estimations and observations. The error of infrared-derived precipitation within IMERG is larger than that from microwave retrieval, with a root mean square error of 7.8 mm for hourly precipitation, and it overlooks warm cloud precipitation in Typhoon In-Fa. The accuracy of microwave retrieval for different types of precipitation also varies, which shows better performance in stratiform precipitation with concentrated particle number concentration (dBN$_w$) and particle effective radius (D_0) compared

收稿日期:2023-03-09;**定稿日期**:2023-11-01

资助项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033)

第一作者:李洪兵,主要从事短临天气预报及关键技术研究。E-mail:lihbmete@163.com

通信作者:夏羽,主要从事中尺度诊断与分析研究。E-mail:xiayu05qx@163.com

to convective precipitation with dispersed dBN_w and D_0. The high-intensity precipitation estimates retrieved from both infrared and microwave are weaker than those of observations, resulting in underestimated precipitation by IMERG precipitation estimations.

Key words: Typhoon In-Fa; GPM IMERG; precipitation verification; FY-4A AGRI; particle spectrum

引 言

降水是全球水循环中重要的组成部分。降水的准确测量不仅能提高天气、气候、水文模型的模拟能力，而且对提高延伸期天气、气候预报时效以及降水预报精度有重要意义(李昶明等，2018；丁一汇等，2020)。目前降水的观测方式主要有三种：地面雨量计测量、天气雷达降水率估测和卫星遥感监测。降水受大气环流和地形的影响水平分布不均，雨量计覆盖范围较小代表性较差。天气雷达相较于雨量计，可覆盖更广的范围，但受到地形地物和"*Z*-*R*"关系(即反射率因子与降水率之间的关系)不确定的影响(王瑾等，2020)。而气象卫星具有覆盖范围广、时空分辨率高以及连续性好等优点，不仅弥补了地面站网在高海拔地区和海洋上观测站点的分布不足，而且自上而下的观测方式避免了地形对探测信号的遮挡，因此被广泛应用于全球范围降水监测(廖捷等，2013)。

热带降雨测量任务(Tropical Rainfall Measurement Mission，TRMM) 于1997年率先开展卫星定量降水估测工作。TRMM卫星上搭载的降水雷达(precipitation radar，PR)极大促进了卫星降水反演研究。TRMM PR为认识和监测热带对流降水提供了大量详实的观测资料，被广泛应用于降水量反演、降水相态划分和云微粒子参数特性等研究(Fu and Liu，2007；杨荣芳等，2022)。全球降水观测(Global Precipitation Measurement，GPM)计划是TRMM的继任者，其核心卫星上搭载了Ku和Ka双频测雨雷达(Dual-frequency Precipitation Radar，DPR)，能够更好地展现降水系统的垂直结构和云微物理过程(傅云飞等，2022)。

全球降水观测计划发布的IMERG降水产品除了利用GPM和TRMM卫星上搭载的测雨雷达和微波成像仪反演的降水以外，还融合了DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)等诸多极轨卫星上微波探测仪反演的降水产品。日本气象厅和欧洲气象卫星组织的地球同步卫星填补了IMERG降水产品中极轨卫星观测空白的区域，实现降水的全球监测。自IMERG发布以来，众多学者对其和同类卫星降水产品、再分析资料的对比验证研究在各地先后展开。例如，Tang 等(2016)对比了2014—2015年IMERG和同类降水产品的适用性，认为在中国大陆地区IMERG表现更好。李昶明等(2018)在评估相近时段同一区域内IMERG和欧洲中心再分析资料后，发现在站点稀疏地区两者精度相当。在美国东部沿海地区和长江流域的适用性研究也证实，对日尺度降水IMERG与实况相比一致性较好(Tan et al.，2016；Liu et al.，2020)。进一步的研究表明，当时空分辨率较低时IMERG估测降水的随机误差相互抵消，观测降水事件的准确率会更高；当时空分辨率更精细时普遍存在IMERG高估弱降水以及低估强降水的问题(Tan et al.，2016)。

台风是造成我国东南沿海大范围降水的重要天气系统，由其引发的暴雨洪涝、中小河流洪水以及次生地质灾害往往造成巨大的人员伤亡和财产损失。现有IMERG对台风降水的研究存在时间尺度不够精细，以及缺乏对估测降水误差深入分析的问题(陈爱军等，2021)。评估更精细时空尺度下IMERG对台风降水的监测能力，对提高预警时效减轻灾害损失具有现实意义。为此，选取2021年台风"烟花"作为研究对象，在评估小时尺度IMERG估测降水能力的基础上，进一步研究降水估测误差的来源，以期为应用和改进IMERG降水产品提供科学依据。

1 说明与方法

1.1 资料说明

使用的资料包括：(1) 台风"烟花"路径数据(http://typhoon.nmc.cn/)。(2) 全球降水观测计划发布的3级融合降水产品IMERG V06 (http://disc.gsfc.nasa.gov/)，时间分辨率为30 min，空间分辨率为0.1°×0.1°。它包含两种准实时降水产品IMERG Early、IMERG Late和一种非实时降水产品IMERG Final(以下分别简称IMERG-E、IMERG-L和IMERG-F)。IMERG-E和IMERG-L较实时分别滞后6 h、18 h不等，IMERG-F一般滞后4个月左右。结合红外和微波资料反演降水时，IMERG-E使用前向拉格朗日时间插值方法，而IMERG-L使用前后向插值方法。IMERG-F不仅使用更多时次的微波资料，并且利用气象站月降水数据进行了趋势订正。(3) GPM卫星双频测雨雷达的探测资料，用于卫星降水产品误差分析。(4) 站点小时降水资料，用于检验卫星降水产品。郭春迓等(2020)对2003—2019年我国台风实况资料的统计结果表明，7级风圈半径频率峰值在300 km附近，因此选取距离台风中心300 km范围内的563个国家气象站。(5) FY-4A多通道扫描成像辐射计(Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI)10.8 μm红外通道数据，用于卫星降水产品误差分析。AGRI包含14个通道，

时间分辨率可达5 min，空间分辨率为0.5~4 km，可以实现对云顶亮温和云顶高度等的观测。所有资料的时间跨度从2021年7月25日12:00 (北京时，下同)台风首次登陆至7月30日17:00台风停止编号为止。以上资料来源于国家气象信息中心全国综合气象信息共享平台“天擎”，并由该平台进行了质控。

1.2 研究方法

研究IMERG产品在台风“烟花”降水过程中的适用性时，首先用双线性插值法将IMERG格点产品插值到站点，累加至小时降水后再与站点降水数据进行统计分析。由于Ku PR能够测量的最小降水强度为0.5 mm·h^{-1}，所以仅选择相同时段内小时降水量在0.5 mm及以上的站点进行对比。检验指标包括相关系数(记为C_C)、均方根误差(记为E_{RMS})、命中率(记为P_{OD})和误报率(记为R_{FA})，公式如下

$$C_c=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(F_i-\bar{F}\right)\left(O_i-\bar{O}\right)}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(F_i-\bar{F}\right)^2}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\bar{O}\right)^2}} \tag{1}$$

$$E_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(F_i-O_i\right)^2} \tag{2}$$

$$P_{OD}=\frac{a_{11}}{a_{11}+a_{01}} \tag{3}$$

$$R_{FA}=\frac{a_{10}}{a_{11}+a_{10}} \tag{4}$$

式(1)和式(2)中n为采样个数；F_i为IMERG估测值；O_i为站点降水观测值；$\bar{F}$为IMERG估测值的平均值；$\bar{O}$为站点降水观测值的平均值。C_C越接近1、E_{RMS}越接近0，说明卫星估测降水产品质量越高。

式(3)和式(4)中a_{11}表示卫星和雨量计同时观测到降水的事件；a_{10}表示卫星观测到降水而雨量计没有观测到降水的事件；a_{01}表示卫星没有观测到降水而雨量计观测到降水的事件。P_{OD}越接近1、R_{FA}越接近0说明卫星估测降水越准确、误报的情况越少。

分析红外反演降水产品误差时，先将10.8 μm红外数据投影变换至等距离圆柱投影后利用双线性插值法插值到站点，以1 h为周期取平均值与站点小时降水进行对比分析。采用Yuter和House(1995)提出的频率等值线随高度变化图(Contoured Frequency by Altitude Diagrams,CFAD)分析台风“烟花”降水过程中的云微物理参数特征，由于其能够同时表现特定物理变量在不同水平高度上的频率分布情况，常用于降水系统垂直结构的研究。

2 IMERG降水产品检验

检验分析IMERG产品时，首先评估其估测台风“烟花”降水的能力，然后从红外和微波两个方面分析降水反演误差。台风“烟花”的移动路径见图1。该台风于2021年7月18日02:00在西北太平洋生成，25日12:30在浙江舟山普陀区首次登陆，26日09:50在浙江平湖市沿海再次登陆，登陆之后迅速减弱为强热带风暴。受副高阻挡影响，台风“烟花”移动缓慢，在浙江、江苏、安徽、山东等地造成持续性强降水。

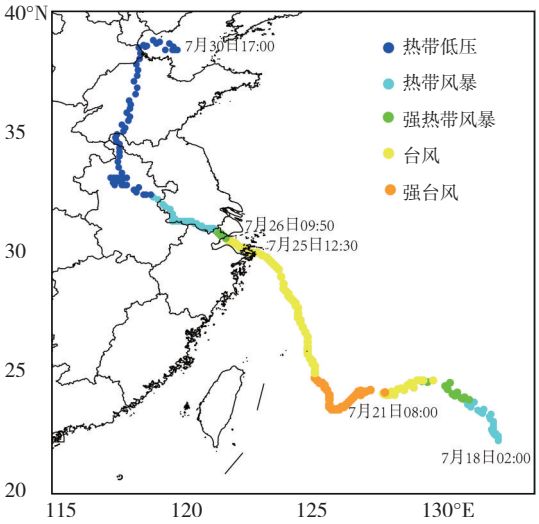


图1 2021年7月18日02:00—7月30日17:00台风“烟花”移动路径

Fig.1 Track of Typhoon In-Fa from 02:00 BT 18 to 17:00 BT 30 July 2021

站点累计降水实况表明，台风“烟花”登陆后中心雨带位于长三角到江苏北部一带(图2a)。IMERG-E、IMERG-L和IMERG-F(以下简称三种卫星降水产品)均能正确反映出累计降水量的空间分布，但同时IMERG卫星估测降水整体存在低估，对累计降水量较大的站点低估程度更严重。台风登陆之后的实况累计降水量最大值为443.0 mm，而三种卫星降水产品累计降水量最大值分别为251.5、351.8和363.6 mm。三种降水产品估测的累计降水量在空间分布上趋于一致，均呈现出登陆地附近累计降水量较大，强降水中心位于江苏中部到山东南部的特征。台风“烟花”减弱为热带风暴后三种产品之间的差异逐渐减小。

对比IMERG-E和IMERG-L两种实时产品，可以发现后者更接近实况，IMERG-L在长三角和黄淮一带的表现明显优于IMERG-E。由于两种实时产品仅在时间插值算法上有所不同，说明使用前后向拉格朗日时间插值方法的IMERG-L比使用前向插值方法的IMERG-E要更合理。而IMERG-F估测的结果跟实况最接近，表明吸收微波观测资料和采用气象观测站月降水量数据订正能够提高降水估测能力。

台风“烟花”造成我国东部地区降水期间，三种降

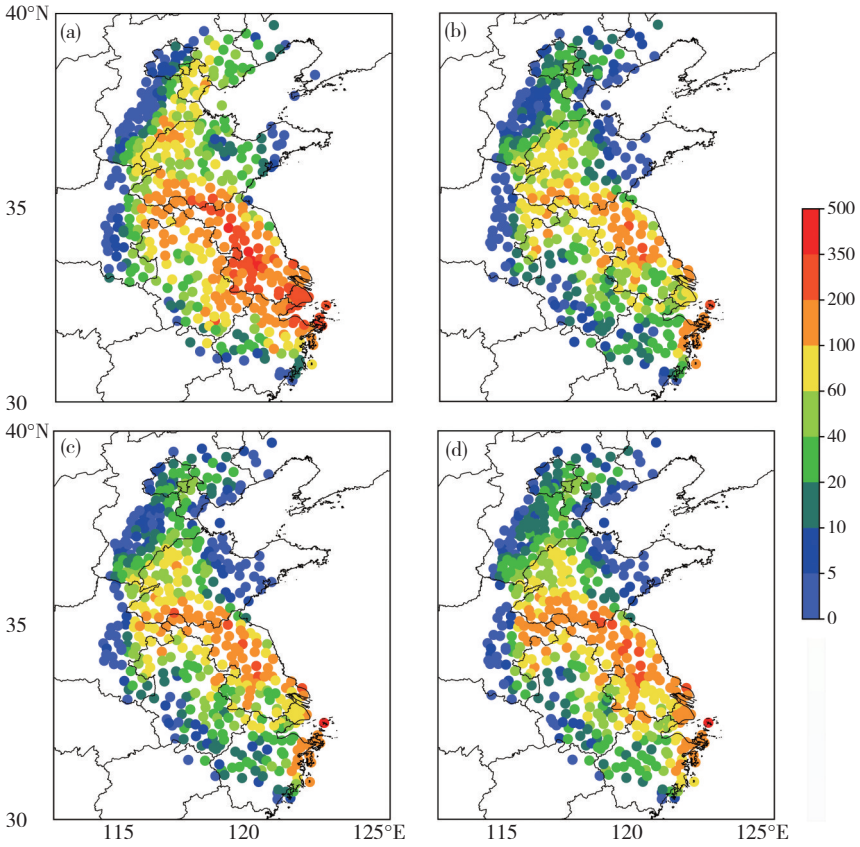


图2 2021年7月25日12:00—7月30日17:00我国东部地区累计降水量(单位: mm)实测值(a)和IMERG-E (b)、IMERG-L (c)、IMERG-F (d)估测值空间分布

Fig.2 The spatial distribution of (a) the observational accumulative precipitation (unit: mm) (b) IMERG-E, (c) IMERG-L, (d) IMERG-F estimations values in the eastern region of China from 12:00 BT on 25 to 17:00 BT on 30 July 2021

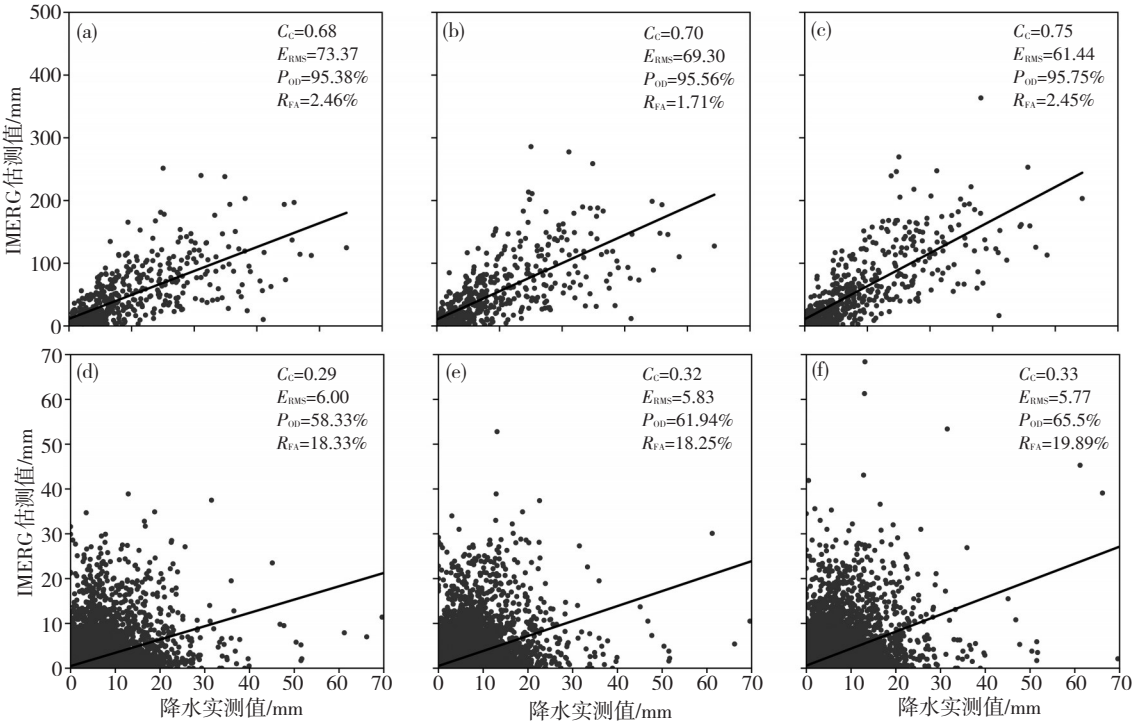


图3 2021年7月25日12:00—7月30日17:00IMERG-E (a, d)、IMERG-L (b, e)、IMERG-F (c, f)估测的累积降水(a—c)和小时降水(d—f)与降水实测值(单位: mm)对比

Fig.3 Comparisons of (a–c) accumulated precipitation and (d–f) hourly precipitation estimated by (a, d) IMERG-E, (b, e) IMERG-L, (c, f) IMERG-F with observational precipitation (unit: mm) from 12:00 BT 25 to 17:00 BT 30 July 2021

水产品估测的累计降水量均比实况偏小，但在不同降水量级上表现并不一致。从实况与IMERG估测累计降水量散点图(图3a—c)中可知，当累计降水量较小时，卫星估测的结果与实况更接近，误差较小；而当降水累计量增加时，估测结果的误差也随之增大。IMERG-E、IMERG-L和IMERG-F三种产品的C_C和P_{OD}依次增大，E_{RMS}依次减小，即对降水的估测能力也依次增强。

从小时尺度降水(图3d—f)来看，IMERG-E、IMERG-L和IMERG-F对降水的估测效果要比累计降水量要差，C_C和P_{OD}均出现了大幅下降。另外，累计降水量和小时降水量均表现出IMERG-F的R_{FA}最高，说明用站点月降水数据进行了趋势订正后，略微提升融合降水产品误报的情况。对于10 mm·h^{-1}以下的降水，三种产品均有轻微的高估；对40 mm·h^{-1}以上的降水，两种实时产品主要表现出低估，而非实时产品有一定程度的改善。融合降水产品的误差随降水量增加而增大，非实时产品在生成过程中吸收了实况降水信息，因而估测的强降水要优于准实时产品。

3 IMERG降水产品误差分析

前述统计结果表明，IMERG-F总体要优于IMERG-E和IMERG-L。IMERG融合降水算法在生成全球降水产品的过程中，优先利用有微波资料的区域，没有微波资料的区域则用红外资料补充。本小节将从红外和微波两个方面分析IMERG估测降水误差。

3.1 红外反演降水误差分析

IMERG除了提供融合降水产品外，还提供只用红外通道反演的降水产品，由于IMERG-E和IMERG-L时效性要求较高，均使用前一个月的红外资料反演降水。为了分析IMERG估测降水误差产生的原因，首先对IMERG仅红外反演降水产品进行检验分析。从图4与图3的对比可以看到，仅红外反演降水产品与融合红外和微波反演降水产品相比，C_C和P_{OD}均有下降，E_{RMS}有所增加。图3中三种融合产品的累计降水量P_{OD}均在95%以上，而仅红外反演降水P_{OD}值不到80%，P_{OD}出现大幅下降。红外反演的降水准确率不如微波探测的结果不仅出现在台风“烟花”降水期间，Tan等(2016)在

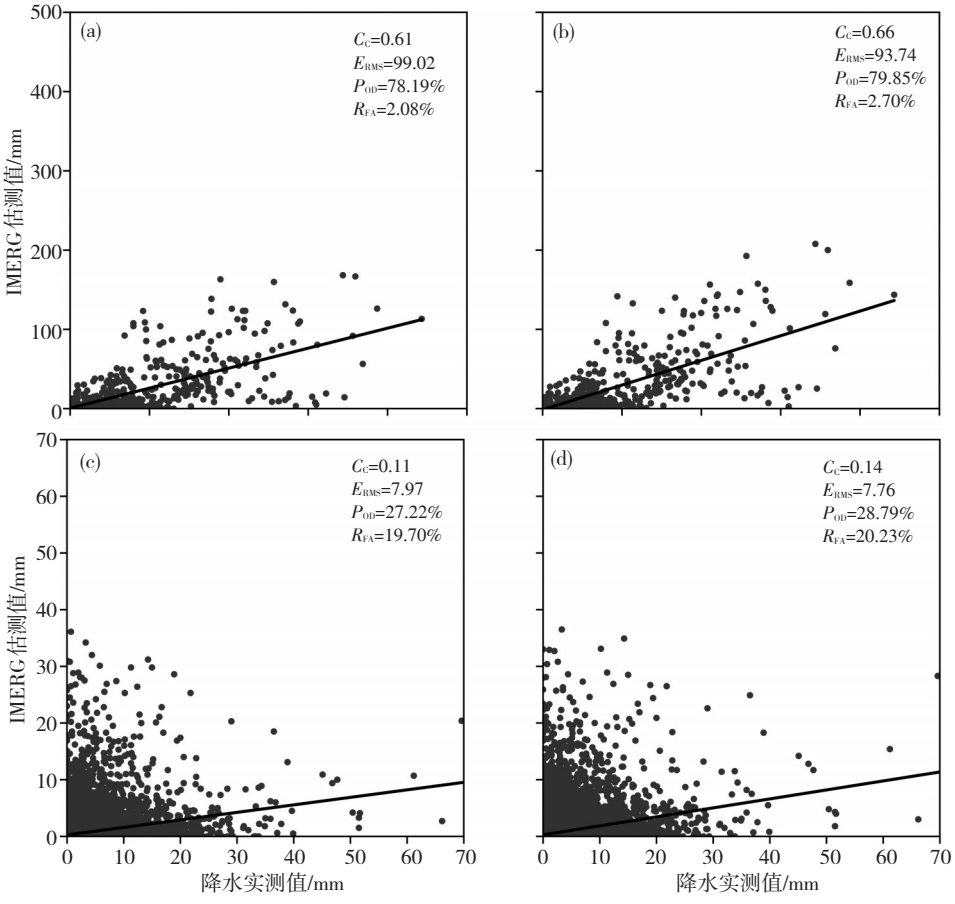


图4 2021年7月25日12:00至7月30日17:00 IMERG仅红外降水估测的累积降水(a—b)、小时降水(c—d)与降水实测值对比

Fig.4 Comparisons of (a–c) accumulated precipitation and (d–f) hourly precipitation estimated by infrared of IMERG with observational precipitation (unit: mm) from 12:00 BT 25 to 17:00 BT 30 July 2021

美国东海岸地面验证中也曾得出类似的结论。这一点在小时降水量上表现的更为明显，融合产品P_{OD}在58%以上，而仅红外反演降水产品的结果最高约为29%。通过对比可以看到仅红外反演降水产品性能整体不如融合降水产品，比实况偏小的程度更明显。

红外通道探测的主要是云顶信息，扣除云本身发出的辐射和地球表面的辐射这两个相对较小的贡献外，主要由云顶温度决定。傅云飞等(2022)指出使用10.8 μm通道亮温来反演地面降水有很大的不确定度，因为该通道只表征了云顶高度信息(间接体现云顶相态)，而不能反映从云顶至云底发生的云降水物理过程信息。微波波束能够穿透云层探测到云中的降水系统，经微波校正的红外反演结果，大幅提高降水反演的P_{OD}，有效减小了仅红外反演降水产品的R_{FA}。

IMERG融合降水产品中的红外降水产品由Hong等(2004)提出的PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System)算法反演得到。PERSIANN-CCS首先利用253 K固定阈值分割云图，以区分降水云与非降水云，然后再从云图中提取各类特征，以匹配不同降水率。PERSIANN-CCS算法本质是从红外亮温到降水率的映射关系。因此只需对比台风“烟花”降水期间红外亮温和站点降水就能够分析估测降水偏小的原因。图5比较了台风“烟花”登陆期间站点小时降水及其对应时段内10.8 μm通道亮温。可见，10 mm·h^{-1}以下的弱降水对应的云顶亮温在198~287 K之间；10~40 mm·h^{-1}之间的中等强度降水对应的云顶亮温在198~278 K之间，除少数降水对应的云顶为液相外，大多数降水对应的云顶为混合相或冰相；40 mm·h^{-1}以上的强降水对应的云顶亮温均在220 K以下，云顶为冰相。当云顶亮温低于253 K时，不同强度降水与10.8 μm通道亮温缺乏一一对应关系，由于红外通道仅表征云顶信息缺少云顶以下降水物理过程信息，在反演降水时存在较大的不确定度。云顶亮温在253~273 K之间的弱降水、中等强度降水和云顶温度在273 K以上的暖云降水将无法被识别为降水云，是造成红外亮温估测台风“烟花”降水偏小的原因之一。

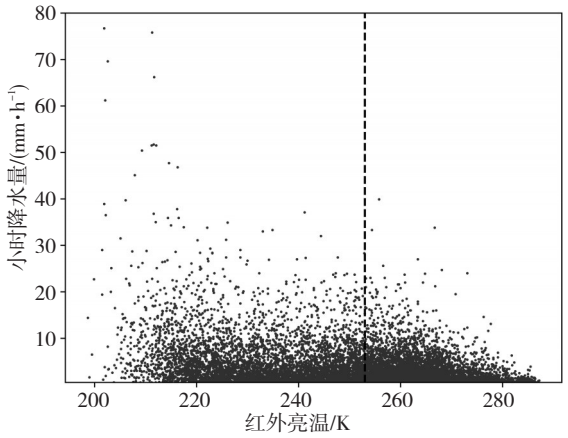


图5 2021年7月25日12:00—7月30日17:00我国东部地区563个国家气象站小时降水实测值(单位: mm)与红外亮温(单位: K)的散点图(图中黑色虚线表示253 K)

Fig.5 Scatter plot of observational hourly precipitation (unit: mm) from 563 national meteorological stations in the eastern region of China and infrared brightness temperature (unit: K) from 12:00 BT 25 to 17:00 BT 30 July 2021 (the black line stands for 253K)

台风“烟花”登陆前后，GPM卫星多次从其上空经过，将DPR测得的降水率与对应时刻红外云图叠加可以直观地看到红外亮温与降水落区的对应关系。从图6a中可以看到，23日06:00“烟花”为强台风，此时有明显的螺旋云系结构，台风眼清晰，最大降水率超过80 mm·h^{-1}的区域出现在台风东南侧的对流云系中。同时注意云顶亮温的高低与降水率缺乏一一对应关系。台风东南方向靠近台风眼一侧的区域降水率普遍较大，远离台风眼的部分降水率迅速减小，表现出同一区域云顶亮温相近但降水率相差较大的特点。

台风“烟花”登陆以后虽然螺旋结构遭到破坏，但螺旋雨带中对流活动依然旺盛。25日19:00“烟花”登陆后减弱为台风级别，红外云图上台风眼已不可见，但螺旋云系结构依然明显(图6b)。DPR从台风“烟花”东南侧擦过，降水强度大值区并没有出现在台风中心的亮温低值区，而是出现在中心螺旋云系的边缘部分。中心螺旋云系降水率水平差异大的特点同样显著，外围螺旋云系中降水微弱，东北部区域红外亮温均在253 K以下，DPR几乎没有探测到降水。27日19:00，仅从红外云图上已无法判断台风中心位置，外围螺旋云系结构松散，对流活动分散。红外云图和降水落区的对应关系进一步减弱(图6c)。28日05:00，台风“烟花”已减弱为热带低压，螺旋云系结构不可见，对流活动减弱峰值降水强度约40 mm·h^{-1}(图6d)。上述说明云顶亮温低值区仅大致指示降水落区，不能获取云顶以下降水物理过程信息，无法体现空间上降水率的差异，在反演降水时存在较大的不确定度。

3.2 微波反演降水误差分析

下面结合DPR对台风“烟花”的观测结果进一步分析融合降水产品的误差来源。IMERG-F在27日19:00和28日05:00估测降水相比实况分别偏少约60.0%、30.1%。表1中27日19:00对流降水对总降水的贡献只占39.1%，表明这一时段内IMERG-F对层状降水和对流降水均有低估。28日05:00随着IMERG-F估测降水相对误差减小，且对流降水对总降水的贡献降低至21.7%，DPR低估降水率大的对流降水也是导致

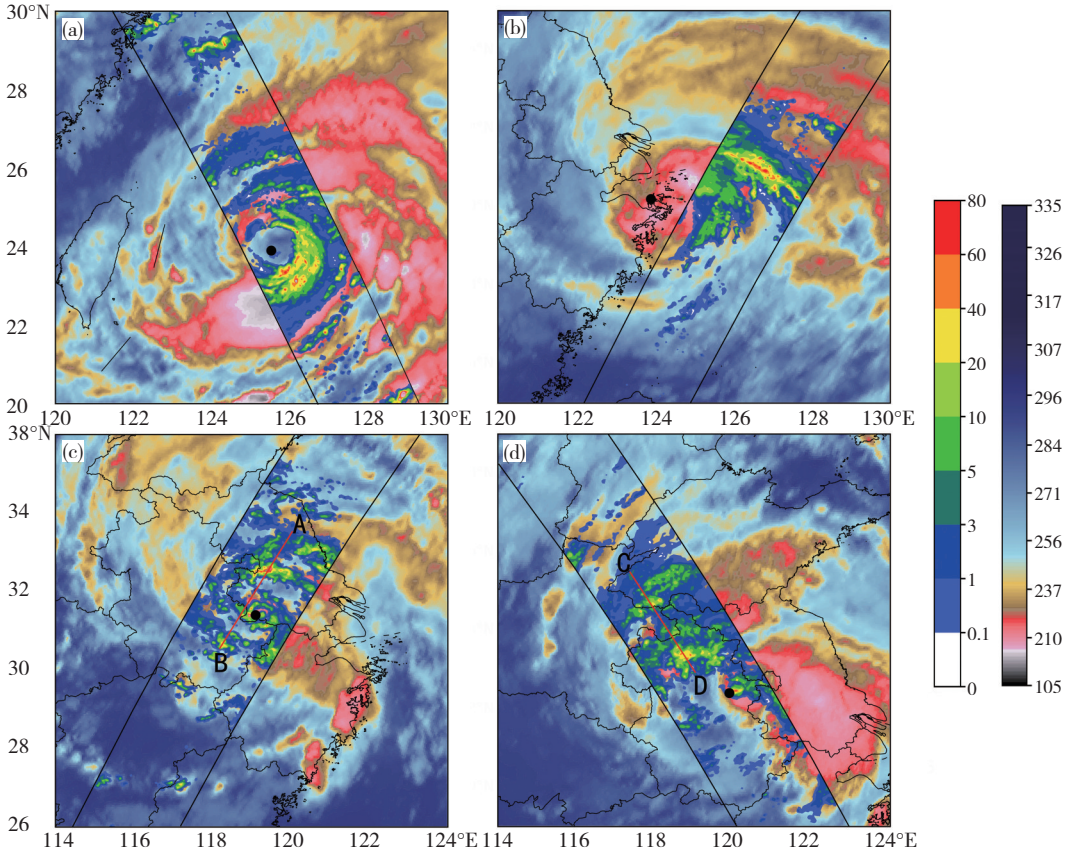


图6 2021年7月23日06:00 (a)、25日19:00 (b)、27日19:00 (c)、28日05:00 (d)台风“烟花”登陆前后FY-4A红外云图(填色，单位: K)、DPR降水率叠加图(AB、CD表示图7中剖面的位置，黑色圆点表示台风中心，填色，单位: mm·h^{-1})

Fig.6 FY-4A infrared cloud images (color-filled areas,unit: K) superimposed with DPR precipitation rate before and after Typhoon In-Fa landfall (AB and CD indicate the position of the vertical profile in Fig.7, black dots represent the typhoon center, color-filled areas, unit: mm·h^{-1}) at (a) 06:00 BT 23 July, (b) 19:00 BT 25 July, (c) 19:00 BT 27 July, (d) 05:00 BT 28 July, 2021

表1 2021年7月27日19:00和28日05:00台风“烟花”螺旋雨带中不同降水类型降水量占总降水量的百分比

Table 1 The rainfall percentage of different types of precipitation in the spiral rain bands of Typhoon In-Fa at 19:00 BT 27 July and 05:00 BT 28 July 2021

降水类型	27日19:00			28日05:00		
	像元/个	降水率/(mm·h^{-1})	百分比/%	像元/个	降水率/(mm·h^{-1})	百分比/%
对流降水	893	5.9	39.1	547	4.2	21.7
层状降水	2233	3.7	60.9	2509	3.3	78.3

IMERG-F估测降水偏低的重要原因。

从7月27日19:00—28日05:00，IMERG-F估测降水误差的下降伴随着降水类型的转变。27日19:00的反射率因子剖面图(图7a)显示台风登陆之后依然还存在旺盛的孤立对流活动，部分对流回波顶高超过10 km，5.5 km以下反射率因子高于40 dBz。DPR对此类降水系统估测误差较大，且往往低估。28日05:00(图7b)台风周围对流活动减弱，零度层亮带特征更加明显，降水类型转为层积混合型降水，DPR对这类稳定的降水估测精度更高。值得注意的是，两个时刻的零度层高度均比较高，27日19:00零度层高度约在5.5 km，28日05:00高度虽然有所下降但也在5 km以上，这表明此时台风“烟花”中存在暖云降水。同时云顶高度在逐渐降低，PERSIANN-CCS在识别此类降水像元时会趋于认为非降水云或降水效率低的降水云。实际上，暖云降水不仅存在台风“烟花”内部，Wang等(2016)研究发现暖云降水普遍存在于中国东南沿海登陆台风中。

除了暖云降水，台风“烟花”中还存在浅对流降水。Masunaga等(2005)依据亮温和回波顶高将浅对流定义为回波顶高小于4 km同时对应红外亮温高于260 K的降水系统。这类降水系统完全不能被PERSIANN-CCS所识别，从而导致红外估测降水偏小。为了探究台风“烟花”内的浅对流降水系统，图8绘制了红外亮温和回波顶高的二维概率密度图，可见7月23日06:00“烟花”加强为强台风后降水系统回

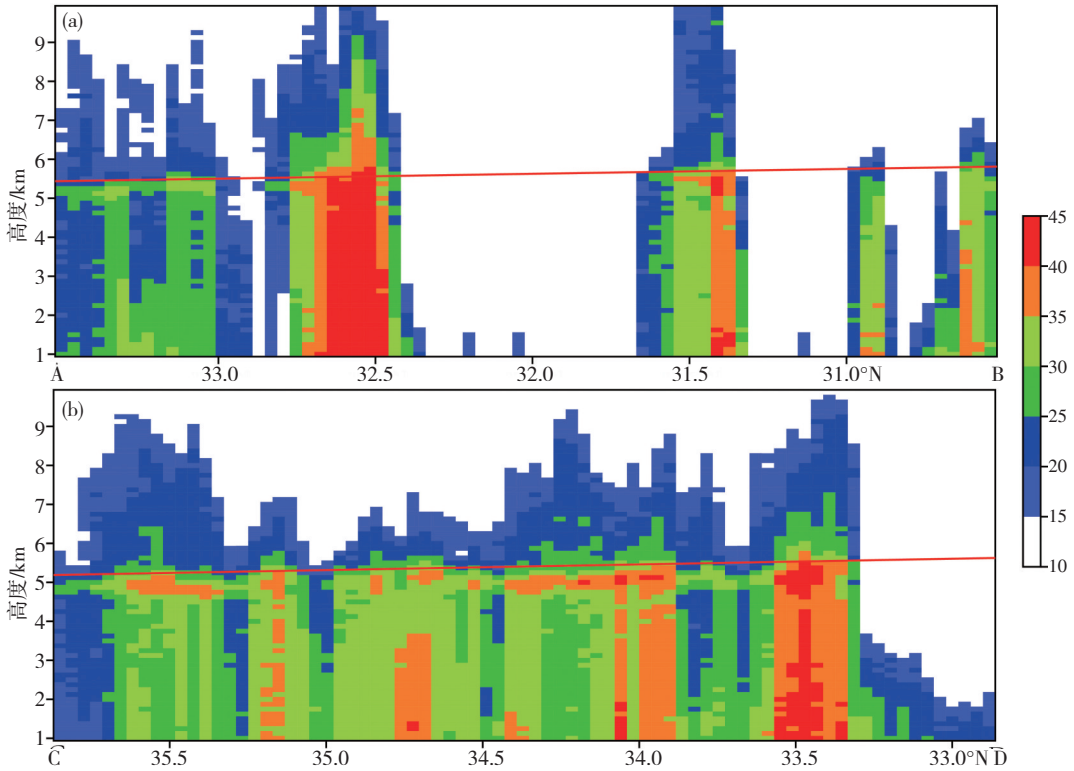


图7 沿图6c—d中AB (a)和CD (b)两点间的反射率因子(填色,单位:dBz,红色实线表示零度层高度)垂直剖面图

Fig.7 The vertical profile of reflectivity factor along line (a) AB and (b) CD in Figure 6c–d (color–filled area, unit: dBz, the red solid line represents the height of the zero degree layer)

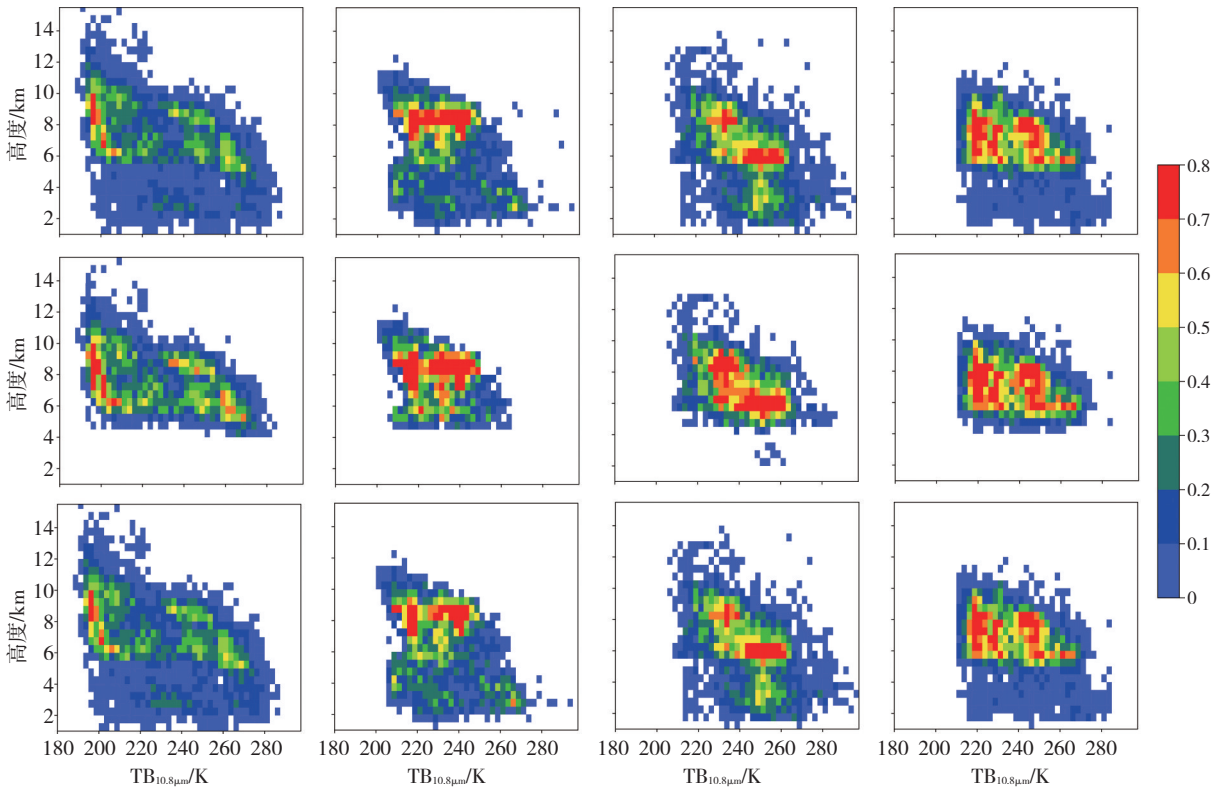


图8 2021年7月23日06:00 (a、e、i),25日19:00 (b、f、j),27日19:00 (c、g、k),28日05:00 (d、h、l)台风“烟花”内所有降水(a—d),层状降水(e—h)和对流降水(i—l)回波顶高与10.8 μm通道红外亮温($TB_{10.8\mu m}$)的二维概率密度图

Fig.8 Two–dimensional probability density function of echo–top height and 10.8 μm channel infrared brightness temperature for (a–d) total precipitation, (e–h) stratiform precipitation and (i–l) convective precipitation in Typhoon In–Fa at (a, e, i) 06:00 BT on 23 July, (b, f, j) 19:00 BT on 25 July, (c, g, k) 19:00 BT on 27 July, (d, h, l) 05:00 BT on 28 July 2021

波顶高超过14 km，红外亮温低至190 K，这一时段降水类型主要是对流降水。7月25日19:00台风“烟花”已经登陆，层状降水和对流降水的回波顶高明显降低大多在12 km以下，主要集中在8 km附近，红外亮温低值区的范围有所减小，最小值均在200 K以上。

7月27日19:00，降水系统出现了新特征，对流降水中浅对流变得明显，部分降水系统的回波顶高由8 km降到6 km。7月28日05:00，浅对流发展增强，降水出现增大趋势，但回波顶高集中在7 km以上，相比于7月25日05:00已经有了减弱的趋势。

DPR自上而下的探测方式能够更直观地展示层状降水和对流降水的垂直结构特征。图9反射率因子CFAD图经过整体最大值归一化处理，水平间隔为1 dBz，垂直间隔为0.25 km。7月27日19:00层状降水反射率因子在对流层低层集中在20~35 dBz，随高度上升反射率因子缓慢下降，在5.5 km附近迅速增大达到峰值出现零度层亮带特征，之后随高度减弱集中在18~22 dBz附近。对流降水的反射率因子特征明显有别于层状降水，一方面出现为数不多反射率因子大于45 dBz的降水回波，另一方面高度小于4 km，反射率因子小于28 dBz的回波出现频率最高，反映出对流降水中以浅对流为主。到了7月28日05:00，层状降水反射率因子低层集中在25 ~ 35 dBz附近，显示出比上一时次强度有所增强，零度层亮带更为明显。30~40 dBz的反射率因子频率明显增加，对流降水相较上一时次也有所增强。反射率因子特征说明从7月27日19:00到28日05:00，台风“烟花”产生的降水经历了一次增强过程，与前面对回波顶高的分析一致。

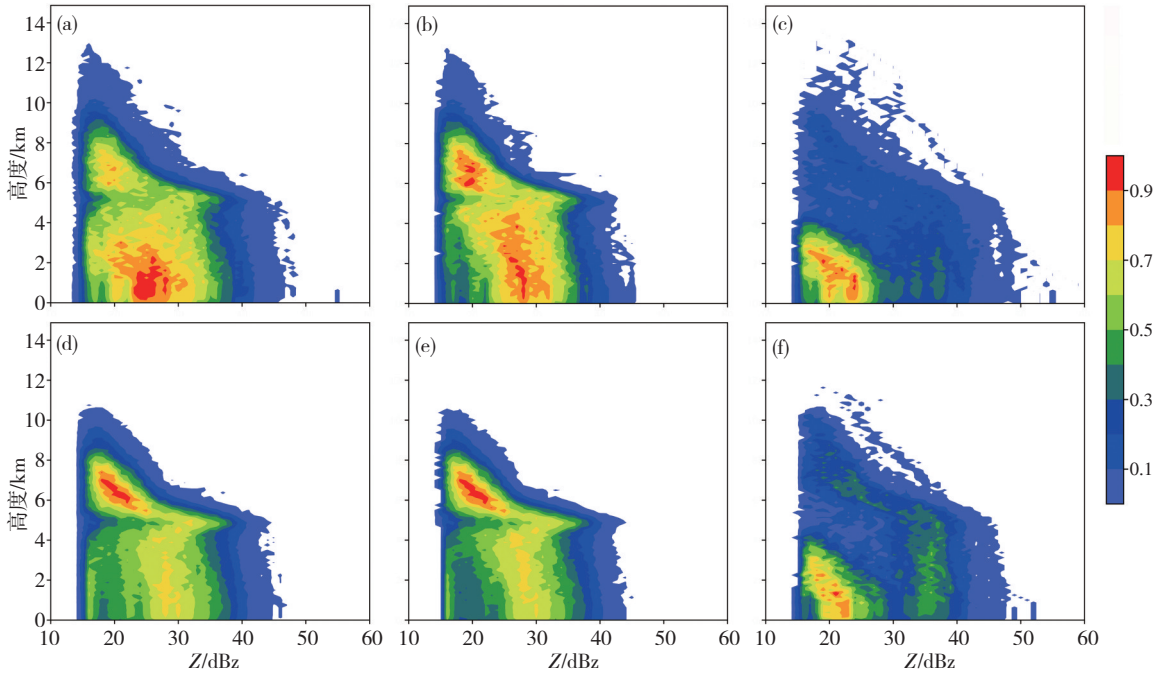


图9 2021年7月27日19:00(a—c)和28日05:00(d—f)台风“烟花”螺旋雨带中所有降水(a、d)，层状降水(b、e)，对流降水(c、f)的雷达反射率因子Z(单位: dBz)频率等值线随高度变化图

Fig.9 The CFAD of radar reflectivity factors (unit: dBz) for (a, d) total precipitation, (b, e) stratiform precipitation and (c, f) convective precipitation in the spiral rain bands of Typhoon In-Fa at (a–c) 19:00 BT on 27 and (d–f) 05:00 BT on 28 July 2021

与图9相对应的粒子数浓度参数dBN_w和粒子有效半径D_0的CFAD图如图10、11所示，从图10粒子数浓度参数dBN_w的CFAD图可见，层状降水dBN_w在5 km以下均较为集中，5 km以上随高度增加略有减小；而对流降水在5 km以下dBN_w变化范围较大，随高度增加变化幅度减小。结合图11可知，在台风“烟花”减弱消散阶段，层状降水D_0和dBN_w变化幅度小，对流降水相比层状降水表现出D_0较小，dBN_w较大。

D_0的CFAD图(图11)表明，27日19:00总降水D_0集中在0.6~1.5 mm范围，并且呈现“双峰”形态，峰值出现在0.9 mm和1.2 mm处。层状降水D_0集中在0.8~1.5 mm，从地面到5 km高度上D_0变化较小，只在近地面附近D_0大值略有减小，可能与湍流造成雨滴破碎有关。从8 km到5 km雨滴有一个明显增大的过程，反映出在这个高度带上水成物碰并增长的过程。

对流降水D_0虽然有超过1.5 mm，但出现频率较少，普遍还是集中在0.6~1.0 mm之间，且高度在4 km以下。7月28日05:00的层状降水D_0相较前一时刻最明显的变化在于5 km以上的粒子半径主要集中在1.0 mm附近，高度在6.5 km。反映出层状降水的性质更加均一，而此时的对流降水的粒子有效半径中心高度在下降到2 km以下，伴随回波顶高的降低，对流活动趋于结束。

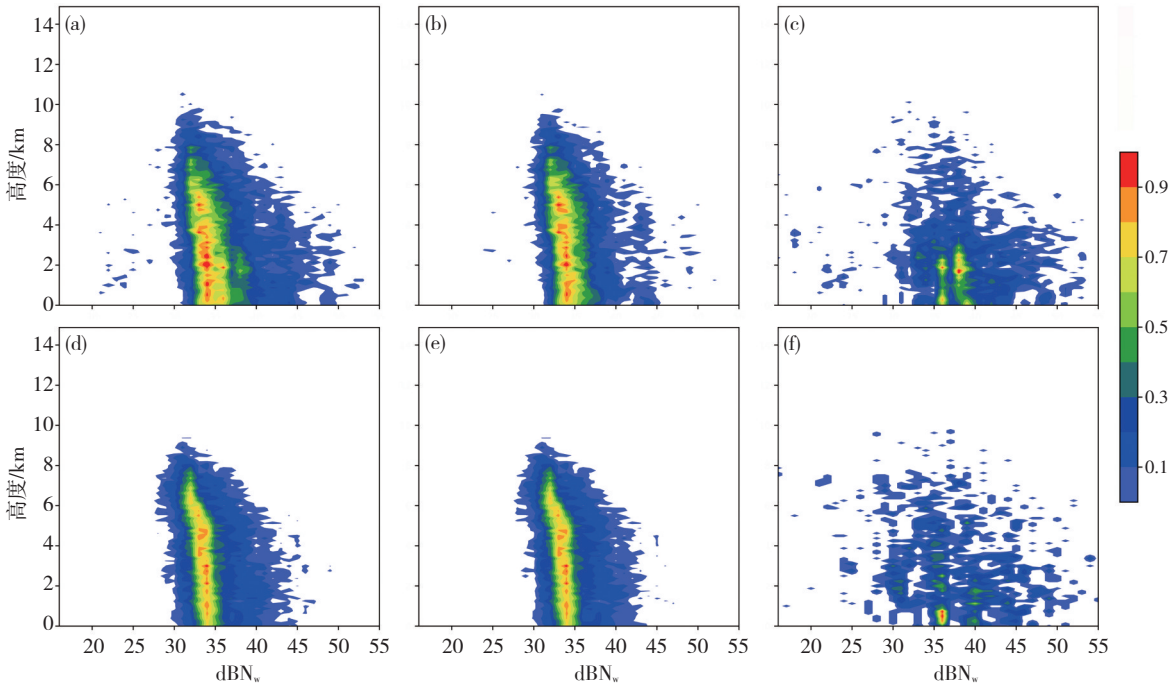


图10 2021年7月27日19:00 (a—c)和28日05:00 (d—f)台风“烟花”螺旋雨带中所有降水(a、d)，层状降水(b、e)，对流降水(c、f)的粒子浓度参数dBN$_w$(单位: m^{-3})频率等值线随高度变化图

Fig.10 The CFAD of particle concentration parameter for total precipitation (unit: m^{-3}), stratiform precipitation and convective precipitation in the spiral rain bands of Typhoon In-Fa at (a–c) 19:00 BT on 27 and (d–f) 05:00 BT on 28 July 2021

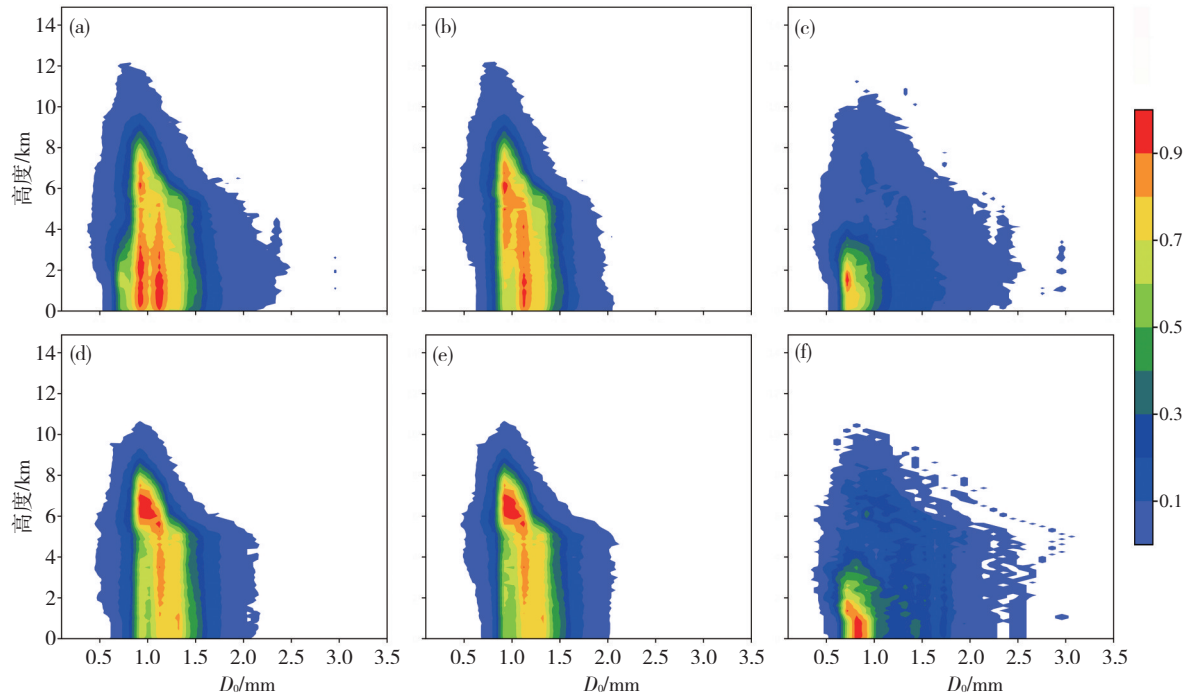


图11 2021年7月27日19:00 (a—c)和28日05:00 (d—f)台风“烟花”螺旋雨带中所有降水(a、d)，层状降水(b、e)，对流降水(c、f)的粒子有效半径D_0 (单位: mm)频率等值线随高度变化图

Fig.11 The CFAD of particle effective radius (unit: mm) for total precipitation, stratiform precipitation and convective precipitation in the spiral rain bands of Typhoon In-Fa at (a–c) 19:00 BT on 27 and (d–f) 05:00 BT on 28 July 2021

4 结论与讨论

以台风“烟花”为研究对象，利用我国东部地区563个国家气象站小时降水数据，首先从不同时间尺度评估GPM IMERG三种卫星融合产品对台风降水的估测能力，然后结合FY-4A AGRI资料和DPR探测资料，分别从红外和微波反演降水的误差探讨了IMERG降水估测偏小的原因，得出主要结论如下：

(1) IMERG产品能够刻画台风“烟花”累计降水的空间分布特征，总体而言EMERG-F的性能最优，IMERG-L优于IMERG-E。三种卫星降水估测产品估测的降水量整体均比实况偏小，在不同降水量级上表现不一致，对弱降水存在略微高估的情况，对中等和强降水存在明显低估。

(2) 10.8 μm通道亮温缺乏与降水强度一一对应的关系，反演降水的不确定性较大。PERSIANN-CCS在使用253 K阈值分割红外云图时会忽略暖云降水。DPR探测结果证实台风“烟花”中存在回波顶高小于4 km的浅对流降水系统，在PERSIANN-CCS算法中无法被识别为降水云。

(3) 台风“烟花”层状降水dBN_w和D_0的值在不同高度上变化较小，而对流降水dBN_w和D_0的值在不同高度上变化较大。相对层状降水系统而言，对流降水系统结构更为复杂，微波反演此类降水难度更大，反演精度更低。无论红外或微波均存在低估强降水的情况，这也是IMERG产品对台风“烟花”降水量估测偏小的原因之一。

需要指出的是，由于降水时空差异巨大，不同区域和季节卫星反演的降水会有差异从而影响估测结果，需要在后续工作中开展不同区域不同降水系统下IMERG的适用性研究。另外，不同红外和微波传感器反演的瞬时降水率在时空分辨率上存在差异，通过融合算法等方法将红外和微波降水结果转换为降水产品，对各算法的结果进行检验分析有助于进一步了解IMERG的误差特性。

参考文献(References)：

陈爱军,吴雪菲,楚志刚.2021.精细化评估GPM/IMERG产品对台风“妮坦”降水的观测精度[J].气象科学,41(5):678-686. Chen A J, Wu X F, Chu Z G. 2021. Refined evaluation of the accuracy of GPM/IMERG in the precipitation process of typhoon Nida [J]. Journal of the Meteorological Sciences,41(5):678-686 (in Chinese). doi:10.12306/2020jms.0037

丁一汇,胡雯,黄勇,等.2020.淮河流域能量和水分循环研究进展[J].气象学报,78(5):721-734. Ding Y H, Hu W, Huang Y, et al.2020.The main scientific of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: A historical review [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(5):721-734 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.064

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. Rainstorm structure of a supercell cloud occurred in Chongqing in May 2018 measured by GPM DPR and GMI [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):1-14 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.001

郭春迓,程正泉,李泳泽,等.2020.热带气旋风圈统计及业务应用[J].广东气象,42(4):56-59. Guo C Y, Cheng Z Q, Li Y Z, et al. 2020. Statistical work on tropical cyclone wind radii and operational application [J]. Guangdong Meteorology,42(4):56-59 (in Chinese)

李昶明,唐国强,洪阳.2018.基于Triple-collocation方法的多源降水产品评估[J].水利水电技术,49(8):19-28. Li C M, Tang G Q, Hong Y. 2018. Triple-collocation method-based assessment on multisource precipitation product [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 49(8):19-28 (in Chinese). doi:10.13928/j.cnki.wrahe.2018.08.003

廖捷,徐宾,张洪政.2013.地面站点观测降水资料与CMORPH卫星反演降水产品融合的试验效果评估[J].热带气象学报,29(5):865-873. Liao J, Xu B, Zhang H Z. 2013. Assessment of experiment of merging guage observation with CMORPH [J]. Journal of Tropical Meteorology, 29(5):865-873. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.05.017

杨荣芳,杨彬云,康晓甫.2022.TRMM卫星降水数据在商洛地区的精度分析及订正[J].沙漠与绿洲气象,16(3):62-67. Yang R F, Yang X Y, Kang X F.2022.Accuracy analysis and correction of TRMM precipitation data in Shangluo area [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(3):62-67 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.010

王瑾,岳治国,贺文彬,等.2020.西安地区积层混合云的Z-R关系研究[J].暴雨灾害,39(4):409-417. Wang J, Yue Z G, He W B, et al.2020.Research on the Z-R relationship of mixed convective-stratiform clouds in Xi'an area [J]. Torrential Rain and Disasters,39(4):409-417. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.011

Fu Y F,Liu G S. 2007. Possible misidentification of rain type by TRMM PR over Tibetan Plateau [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,46(5):667-672.doi:10.1175/JAM2484.1

Hong Y,Hsu K, Sorooshian S,et al. 2004. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,43(12):1834-1853. doi:10.1175/JAM2173.1

Liu J Y, Du J, Yang Y M, et al. 2020. Evaluating extreme precipitation estimations based on the GPM IMERG products over the Yangtze River Basin, China [J] .Geomatics, Natural Hazards and Risk,11(1):601-612. doi:10.1080/19475705.2020.1734103

Masunaga H,L'Ecuyer T S,Kummerow C D. 2005. Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical Pacific.Part I:Spatial structure [J]. Journal of Climate,18(6):823-840. doi:10.1175/JCLI-3304.1

Tan J, Petersen W A,Tokay A, et al. 2016. A noval approach to identify sources of errors in IMERG for GPM ground validation [J]. Journal of Hydrometeorology,17(9):2477-2491. doi:10.1175/JHM-D-16-0079.1

Tang G Q, Ma Y Z, Long D, et al. 2016. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales [J]. Journal of Hydrometeorology,533:152-167. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.12.008

Wang M J,Zhao K,Xue M,et al.2016.Precipitation microphysics characteristics of a Typhoon Matmo (2014) rainband after landfall over eastern China based on polarimetric radar observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121:12415-12433. doi:10.1002/2016JD025307

Yuter S E,House R A. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus.Part II:Frequencydistributions of vertical velocity,reflectivity, and differential reflectivity [J]. Monthly Weather Review123(7):1941-1963. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1941:TDKAME>2.0.CO;2

（责任编辑　何明琼）