

# 星载雷达在台风暴雨宏微观特征分析中的应用

杜爽<sup>1\*</sup>, 吴彬<sup>2</sup>, 李艳芳<sup>2#</sup>, 王丹丹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长兴县气象局, 浙江 湖州

<sup>2</sup>湖州市气象局, 浙江 湖州

收稿日期: 2024年2月16日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月21日

## 摘要

“烟花”台风是有气象记录以来首个在浙江省内两次登陆的台风, 其引导气流弱, 移速缓慢, 影响时间长。为探究“烟花”台风减弱阶段在浙北地区造成的强降水的分布特征及其云微物理垂直特征, 本文利用星载雷达GPM资料, 研究了2021年7月27日夜间“烟花”台风的降水率分布、雨顶高度、降水宏微观垂直结构及云顶亮温的分布特征, 并与地基雷达观测进行了对比。结果表明: 在“烟花”减弱阶段, 台风雨带中20~40 mm/hr的雨强落区基本对应6~10 km的雨顶高度, 位于台风眼壁处。微观方面, 强降雨区三维空间内均对应50以上的粒子数密度, 相较而言, 台风眼壁处水凝物粒子直径更大, 在1.5~1.9 mm; 台风外围处水凝物粒子直径在1.5 mm以内, 但其粒子数浓度最大可达到55以上, 这种高浓度的环境条件有利于降水粒子碰并聚合和直径增长, 使得降水有加强潜势。位于台风眼壁的降水多数由对流性降水所组成, 少部分层云性降水; 西南象限外围螺旋雨带中对流性降水比重减小, 但仍带来15 mm/hr以上的雨强。台风影响区域均有丰富冰水混合物存留, 降水云滴的有效碰并增长活跃, 对地面强降水的形成有正向贡献。同时, GPM与地基双偏振雷达探测结果十分相近, 这证实了星载雷达反演产品在探测反演台风降水中的可靠性。

## 关键词

星载雷达, “烟花”台风, GPM, 降水垂直结构, 双偏振雷达

# Application of Space-Borne Radar in the Analysis of Macro and Micro Characteristics of Typhoon Rainstorm

Shuang Du<sup>1\*</sup>, Bin Wu<sup>2</sup>, Yanfang Li<sup>2#</sup>, Dandan Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Changxing Meteorological Bureau, Huzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Huzhou Meteorological Bureau, Huzhou Zhejiang

Received: Feb. 16<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 21<sup>st</sup>, 2024

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杜爽, 吴彬, 李艳芳, 王丹丹. 星载雷达在台风暴雨宏微观特征分析中的应用[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 300-309. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132032

## Abstract

“In-Fa” typhoon is the first typhoon to land twice in Zhejiang Province since meteorological records. Its guiding air is weak, moving slowly and affecting time is long. To explore the distribution characteristics of heavy precipitation and its vertical characteristics of cloud microphysics caused by “In-Fa” typhoon in Northern Zhejiang during the weakening stage, this paper studied the distribution characteristics of precipitation rate, rain top height, macro- and micro-vertical structure, and cloud top brightness temperature of “In-Fa” typhoon in the night of July 27, 2021 using space-borne radar GPM data, and compared them with ground-based radar observation. The results show that during the weakening stage of “In-Fa” typhoon, the 20~40 mm/hr rain intensity area in the typhoon rain band corresponds to the rain top height of 6~10 km, which is located at the eye wall of the typhoon. In the microcosmic aspect, the particle number density in the three-dimensional space of the strong rain belt corresponds to more than 50. In comparison, the diameter of hydrocondensate particles at typhoon eye wall is larger, ranging from 1.5 to 1.9 mm. The diameter of hydrocondensate particles outside the typhoon is less than 1.5 mm, but the maximum particle concentration can reach 55 or more. The high concentration ambient condition is beneficial to precipitation particle collision and aggregation and the growth of diameter, which makes precipitation have an enhanced potential. Most of the precipitation at typhoon eye is composed of convective precipitation, with less stratiform precipitation. In the outer spiral rain belt of the southwest quadrant, the proportion of convective precipitation decreased, but still brought more than 15 mm/hr of rain intensity. The typhoon-affected areas are rich in aqueoglacial mixture, and the effective collision and growth of cloud droplets are active, which makes a positive contribution to the formation of heavy rainfall. At the same time, the detection results of GPM and ground-based dual-polarization radar are very similar, confirming the reliability of space-borne radar inversion products in detecting and retrieving typhoon precipitation.

## Keywords

Space-Borne Radar, “In-Fa” Typhoon, GPM, Precipitation Vertical Structure, Dual-Polarization Radar

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

台风是影响我国最剧烈的一类天气现象之一，其带来的暴雨、大风和风暴潮等常引发巨大的经济损失，严重影响人民生命财产安全[1]。大气垂直方向的降水-云微物理过程可反映降水云团内诸多动、热力结构特性，从而决定台风降水的分布和强度[2] [3]，同时降水垂直微物理过程导致的热变化也会对台风的发展产生重大影响。目前的台风降水预报较依赖数值模式，随着数值模式性能的改进及预报员对天气尺度环流形势认知的提高，业务上对台风暴雨的路径和影响预报把握得越来越好。但是，对台风暴雨的强降水中心位置和强度的预报仍存在一定误差。目前，仍缺乏适宜的云参数化方案来优化降水的预报效果，其主要原因之一就是对于降水垂直方向上的水凝物粒子分布的认识还不够充分[4]。此外，雷达反演地面降水的偏差很大一部分来源于降水垂直结构变化，融化层附近的降水回波特征尤为重要[5] [6]。因此，全面认识降水的垂直分布及宏微观物理特征能更好地理解降水云与热、动力机制之间的关联以及优化台风降水预报预警技术。

GPM (Global Precipitation Measurement)作为新一代全球卫星降水观测计划，其搭载的主要仪器由双

频测雨雷达 DPR (Dual-frequency Precipitation Radar)和微波辐射计 GMI (GPM Microwave Imager)组成,可实现对台风降水结构的垂直探测。GPM 数据发布后,诸多学者对其数据质量进行了评估、检验工作,同时基于星载雷达降水反演和探究对流过程垂直结构信息的研究也取得了一定进展[7] [8]。Chandrasekar 等(2015)通过对 GPM 捕捉到的 80 个洋面风暴天气的降水廓线、亮带信息以及雷达反射率因子与地基雷达的探测结果进行对比,评估得到两者探测结果较一致[9]。卢美圻等(2017)得出双频降雨雷达 DPR 和地基 S 波段雷达探测“彩虹”台风的结果十分相近[10],证明了 GPM DPR 数据质量可靠。方勉等(2019)利用 GPM 降水产品探究了超强台风“玛丽亚”降水结构,揭示了超强台风的降水云系微物理过程变化特征[11],丰富了对于探测有限的海上台风的降水结构的认识。

本文利用 GPM 卫星 DPR 及 GMI 产品,分析了 2021 年 7 月 27 日夜间“烟花”台风的降水率分布、宏微观垂直结构、雨顶高度及云顶亮温的分布特征,并与地基雷达观测进行了对比,以期深入了解台风的降水结构,尤其是在台风减弱阶段带来的持续强降水原因,为台风降水预报提供新视角。

## 2. GPM 数据及产品

本文所用资料为 GPM 提供的 DPR、GMI 轨道级资料。其中, DPR 由工作频率 13.6 GHz 的 Ku 波段及 35.5 GHz 的 Ka 波段两部雷达组成,星下点的水平分辨率均为 5 km,垂直分辨率为 250 m,探测高度约为 22 km。可提供详尽的逐轨降水信息,包括三维的衰减订正后的降水强度、降水反射率因子、雨滴谱(Droplet Size Distribution, DSD)以及二维的零度层高度、亮带高度和厚度、回波顶高,此外还提供降水类型分类和下垫面属性等信息。GMI 有 13 个微波通道,频率范围 10 GHz 至 183 GHz,可提供云内液态水含量等信息。

## 3. 台风“烟花”个例分析

### 3.1. 台风概况

2021 年第六号台风“烟花”于 7 月 18 日 02 时在西北太平洋洋面上生成,25 日 12 时 30 分以台风级(最大风力 38 米/秒(13 级),中心最低气压 965 百帕)在舟山市普陀区沿海第一次登陆,登陆后在舟山本岛滞留 5 小时,而后进入杭州湾停留长达 16 小时,26 日 9 时 50 分再次登陆嘉兴平湖市沿海,7 小时后移出浙江进入江苏,先后穿过苏州、太湖、无锡,进入安徽后逐渐北上,为有气象记录以来首个在浙江省内两次登陆的台风。

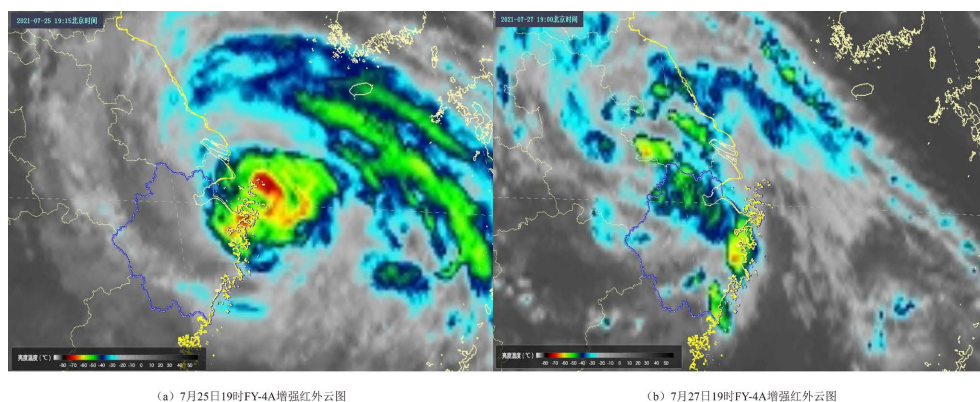


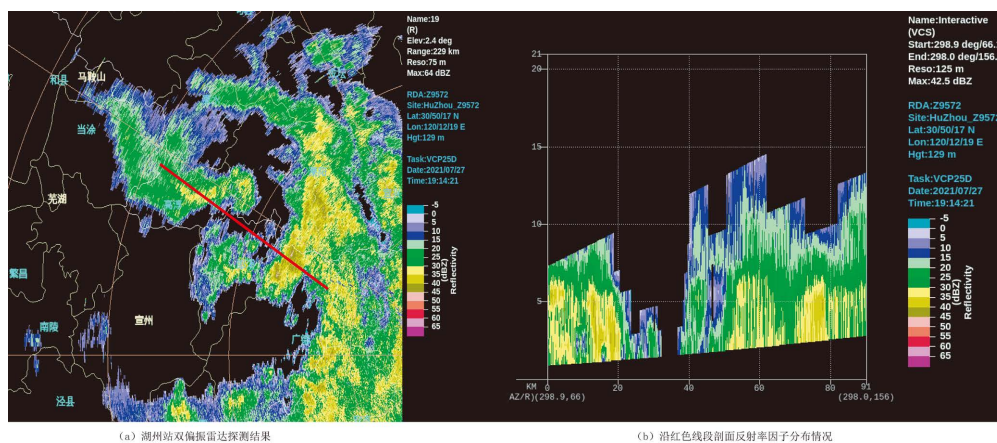
Figure 1. Fy-4A enhanced infrared cloud image: (a) 19:00 on July 25; (b) 19:00 on July 27

图 1. FY-4A 增强红外云图: (a) 7 月 25 日 19 时; (b) 7 月 27 日 19 时

“烟花”台风的典型特点是:引导气流弱,移速缓慢。浙北地区自 22 日起受外围环流影响风雨明显,至 28 日主体移入安徽北部后影响结束。台风影响期间, GPM 卫星捕捉到两次台风降水垂直结构。7 月

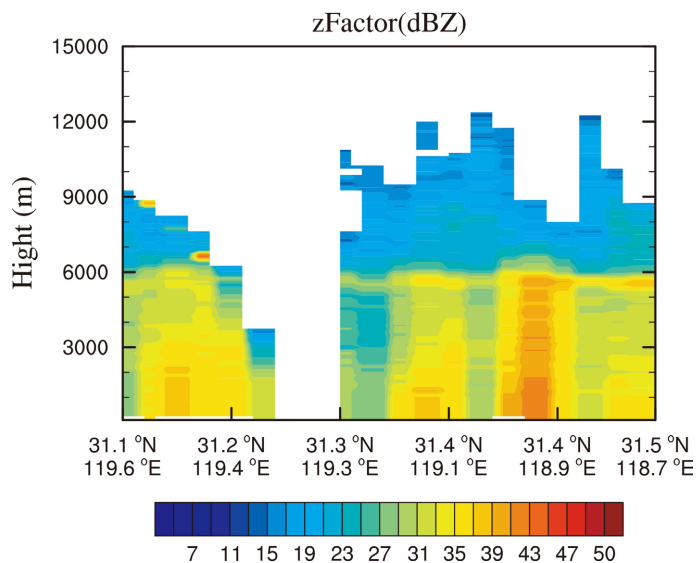
25日19:14至19:16(北京时)扫描到位于东海洋面的台风外围云系,7月27日19:04至19:05(北京时)扫描到位于浙北北部的台风主体。从FY-4A增强红外云图(图1)可见,25日19时台风于杭州湾打转停滞,强对流云团位于杭州湾近海海域。27日19日台风中心虽移出浙北,强度减弱为热带风暴级,但其螺旋雨带亮温仍在 $-50^{\circ}\text{C}$ 左右,并有增强趋势,配合浙北山区地形,台风降水或将增强。结合实况,27日夜间断浙北长兴大部地区出现暴雨,西北部山区大暴雨。

本文将利用GPM卫星数据着重分析了台风在减弱阶段在浙北地区所造成的强降水分布特征及云微物理的垂直特征,以期从星载雷达角度探究台风监测和预报预警技术。



**Figure 2.** Detection results of dual-polarization radar at Huzhou (a) and reflectance factor distribution along the red line section (b)

**图 2.** 湖州站双偏振雷达探测结果(a)和沿红色线段剖面反射率因子分布情况(b)



**Figure 3.** DPR corrected reflectance factor distribution along the red line section in Figure 2

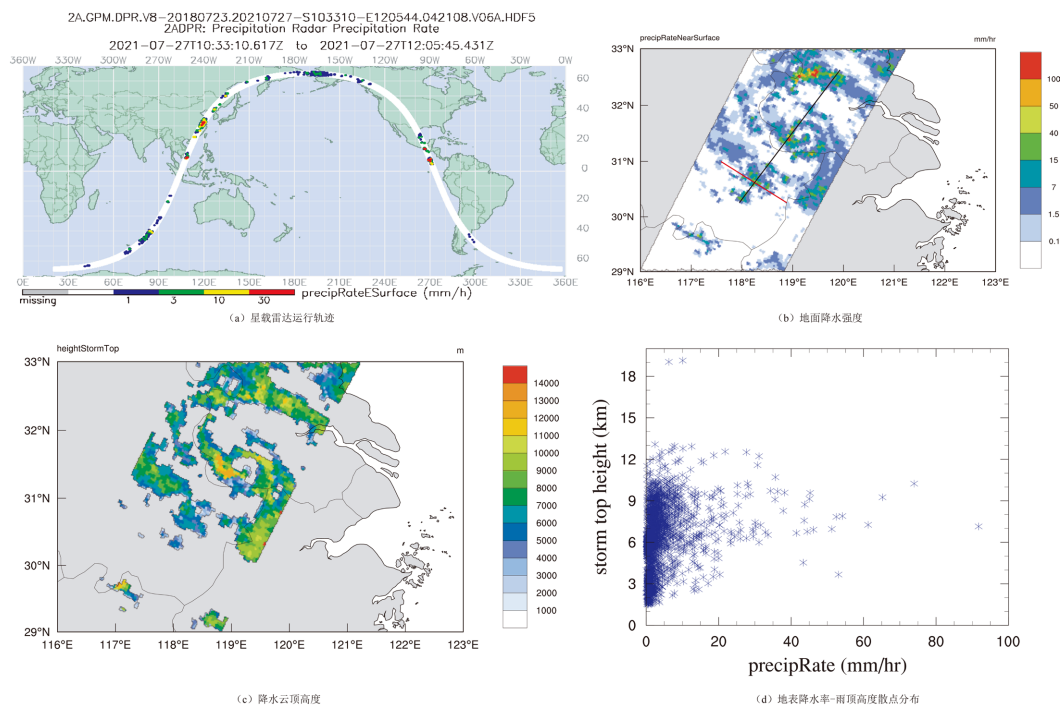
**图 3.** 沿图 2 红色线段剖面的 DPR 订正后的反射率因子分布

为了证实GPM星载雷达探测数据在此次过程的适用性,使用台风影响时段2021年7月27日19:14湖州站双偏振雷达的探测结果作为参照,如图2所示,沿红色线段对雷达数据做反射率因子垂直剖面,再按相同方法做星载雷达订正后的反射率因子垂直剖面,如图3所示。两者探测结果相似,地基雷达最

大反射率因子 42.5 dBz，星载雷达探测最大 42.9 dBz，三个强回波区在回波强度、雨顶高度和结构上均一致，这体现了 DPR 星载雷达反演产品的可靠性。

### 3.2. 地表降水与雨顶高度

图 4 是 GPM 卫星 042108 号运行轨迹，其捕捉到 7 月 27 日 19:04 位于浙北北部的台风主体。卫星反演的近地面降水率图显示，小时雨量 15~20 mm 的落区位于台风前进方向的东北及西南象限，雨带呈气旋式旋转，强降雨带后续在浙江湖州北部产生明显降水。雨顶高度是双频雷达自上至下探测的第一个降水回波信号所在高度，可反映降水过程中上升运动强弱以及大气稳定性的有效参量，云体中上升气流越强盛雨顶高度越高，此时一般对应较强的地面降水。台风“烟花”的雨顶高度分布及近地表降水率 - 雨顶高度散点分布情况如图 4(d)所示，可见台风雨带垂直伸展高，雨顶高度集中在 5~11 km，在 6~7 km 处达到峰值，最大伸展高度超过 13 km，20~40 mm/hr 的雨强落区基本对应 6~10 km 的雨顶高度，位于台风眼壁处。



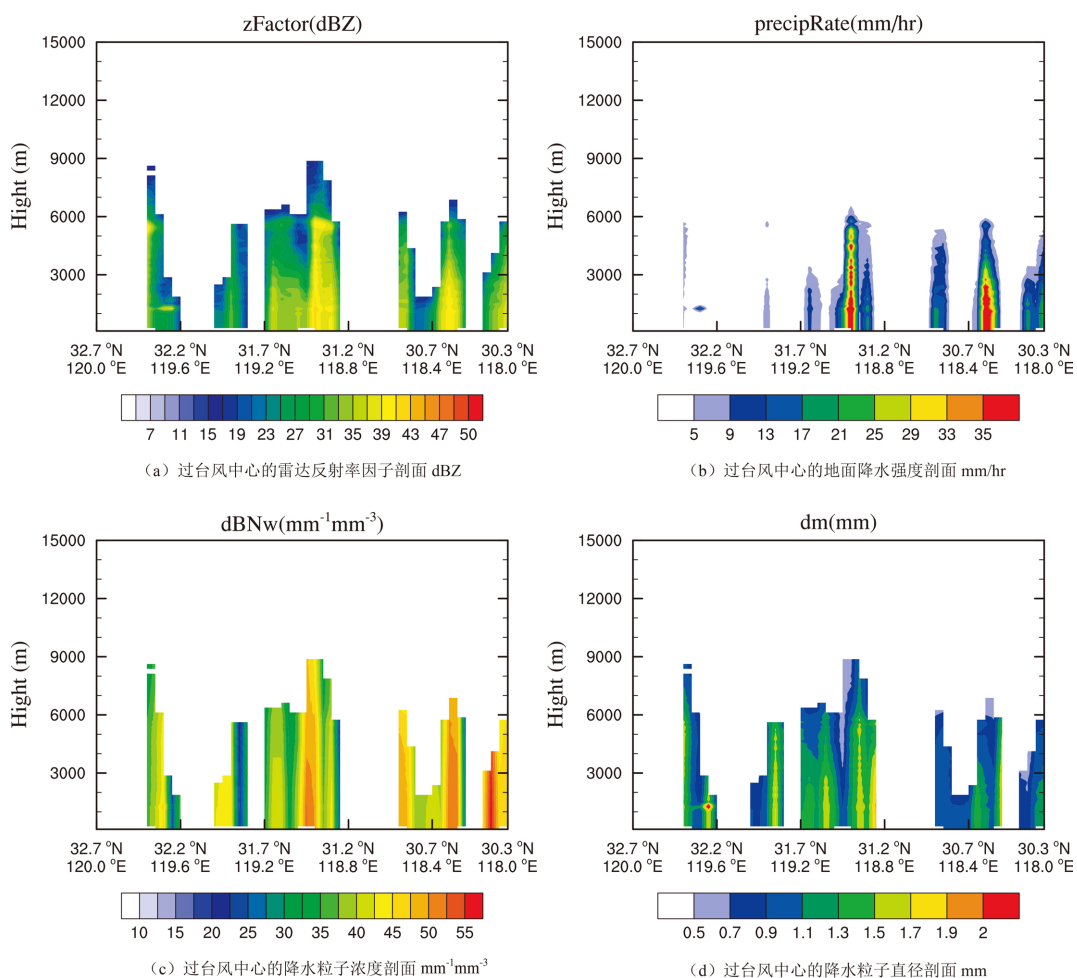
**Figure 4.** GPM satellite trajectory (a) and precipitation parameter distribution of “In-Fa” typhoon: (b) Precipitation rate near surface, (c) Rain top height; (d) Precipitation rate near surface-rain top height scatter distribution  
**图 4.** GPM 卫星运行轨迹(a)和“烟花”台风区域降水参数分布: (b) 地表降水率; (c) 雨顶高度; (d) 地表降水率 - 雨顶高度散点分布

### 3.3. 垂直方向上的宏微观特征

降水垂直方向的云微物理过程与地面降水的发生和强度有着密切关联[12][13]。为更好地探究台风内部的降水三维宏微观结构，分别过台风中心(图 4 黑线)及其西南象限的强降雨带(图 4 红线)绘制剖面。其中，雷达反射率因子、三维降水率的分布反映降水宏观垂直分布特征，而粒子浓度参数及粒子直径是影响降水强度的两个重要水凝物粒子参数，可反映降水的云微物理过程。

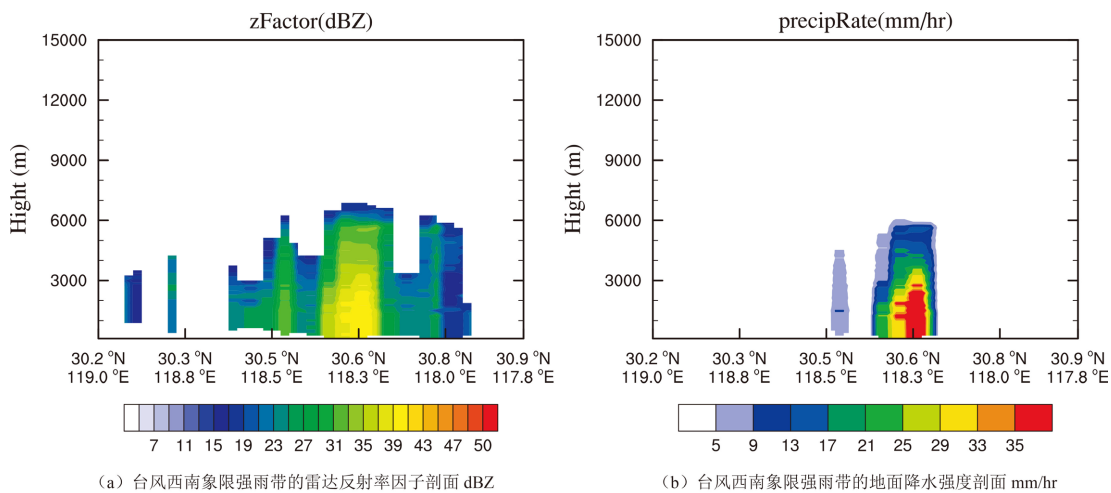
过台风中心的降水剖面如图 5 所示，降水宏观垂直结构显示，小时雨强 20 mm 以上的雨区反射率均在 39 dBZ 以上，并且强回波区由地表伸展至 6 km 左右高度，在近地面反射率因子可达 50 dBz。微观垂直结构方面，两个强降雨区均对应 50 以上的粒子浓度，相较而言，台风眼壁处水凝物粒子直径更大，在

1.5~1.9 mm, 台风外围处水凝物粒子直径在 1.5 mm 以内, 但其粒子浓度最大在 55 以上, 这种高浓度的环境条件有利于降水粒子碰并聚合和直径增长, 降水有加强之势。



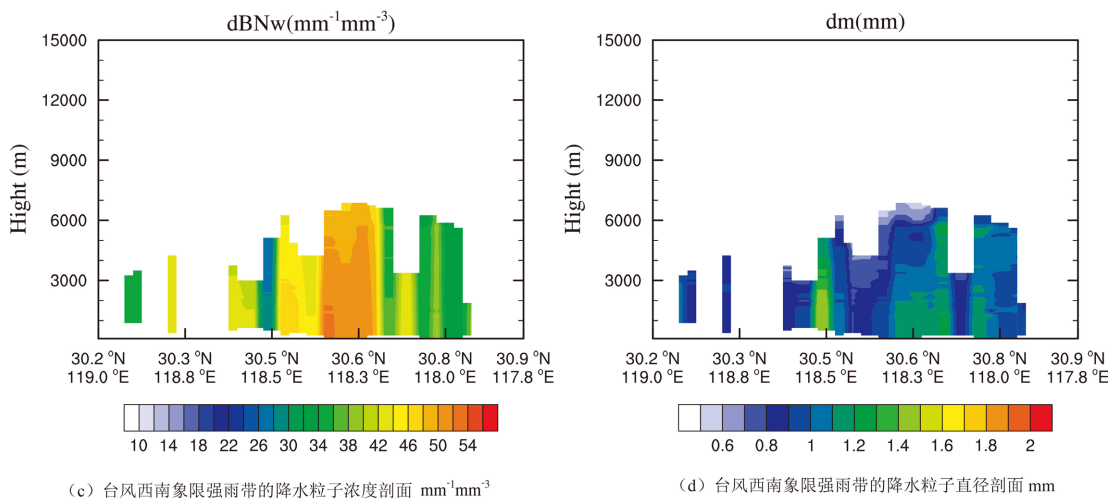
**Figure 5.** Precipitation profile through center of typhoon: (a) Radar reflectivity factor; (b) Precipitation rate; (c) Particle number density; (d) Particle diameter

**图 5.** 过台风中心的降水剖面: (a) 雷达反射率因子; (b) 降水率; (c) 粒子浓度; (d) 粒子直径



(a) 台风西南象限强降雨带的雷达反射率因子剖面 dBZ

(b) 台风西南象限强降雨带的地面降水强度剖面 mm/hr



**Figure 6.** Precipitation profile through rain belt in the southwest quadrant of typhoon: (a) Radar reflectivity factor; (b) Precipitation rate; (c) Particle number density; (d) Particle diameter

**图 6.** 台风西南象限的强降雨带剖面: (a) 雷达反射率因子; (b) 降水率; (c) 粒子浓度; (d) 粒子直径

台风西南象限的强降雨带剖面(图 6)显示,虽然 0~6 km 反射率因子较强,但强降水只集中在 3 km 以下,对应粒子浓度 45~55, 粒子直径 1.2~1.4 mm。3 km 以上粒子直径明显减小,说明降水粒子在下落过程中得到了碰并增长从而形成高浓度的大雨滴,造成地面的短时强降水( $\geq 20 \text{ mm/hr}$ )。而位于(30.3°N, 118.8°E)处的降水回波反射率与粒子浓度基本达到了形成强降水的条件,但其较小的水凝物粒子直径( $< 1 \text{ mm}$ )导致其小时雨强在 10 mm 左右,可见粒子尺度大小对降水效率的影响较为重要。

### 3.4. 降水类型分布

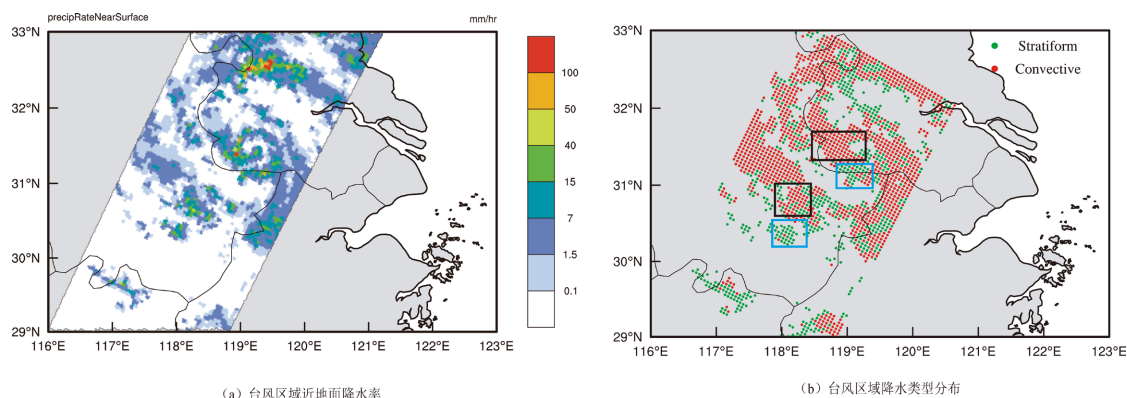
此次台风事件的降水类型分布情况见表 1, 台风雨带中的层云降水像素点数量几乎为对流降水样本量的一倍多, 对流降水样本比重 33.6%, 层云降水样本比重 66.1%。层云降水由于样本量明显多于对流降水, 其降水贡献比也略高于对流降水。但就平均降水率而言, 对流降水的降水效率(6.43 mm/hr)无疑高于层云降水(4.37 mm/hr)。

**Table 1.** Frequency of precipitation samples of “In-Fa” typhoon detected by GPM at 19:00 on July 27, 2021  
**表 1.** 2021 年 7 月 27 日 19 时 GPM 探测的“烟花”台风降水样本频次

降水类型	样本数	样本数比重	降水贡献比	平均降水率(mm/hr)
对流降水	786	33.6%	42.7%	6.43
层云降水	1548	66.1%	57.2%	4.37

从近地面降水率分布图(图 7)来看, 降水率大值区位于台风眼壁, 多数由对流性降水所组成, 少部分层云性降水; 其次位于台风西南象限的外围螺旋雨带中, 对流性降水比重减小, 但仍带来 15 mm/hr 以上的降水量。为更好地研究台风降水垂直结构, 分别在台风眼壁、台风西南象限选取对流降水及层云降水区域计算反射率因子降水廓线。对流性降水反射率因子从风暴顶到地面基本呈增强趋势, 并且地面降水越大粒子增长至高浓度的过程越快, 同时低层大气含水量、温度的变化使得低层降水云反射率因子廓线存在波动。如较小的雨滴粒子在下落过程中受到蒸发和上升气流的影响较大, 云粒子群出现负增长; 而大的雨滴粒子在增长至足够大后也会破裂成小雨滴, 这造成了对流性降水在近地面降水率骤然减小。区别于对流性降水, 层云性降水反射率因子廓线有显著亮带特征。亮带附近降水反射率因子随高度降低变

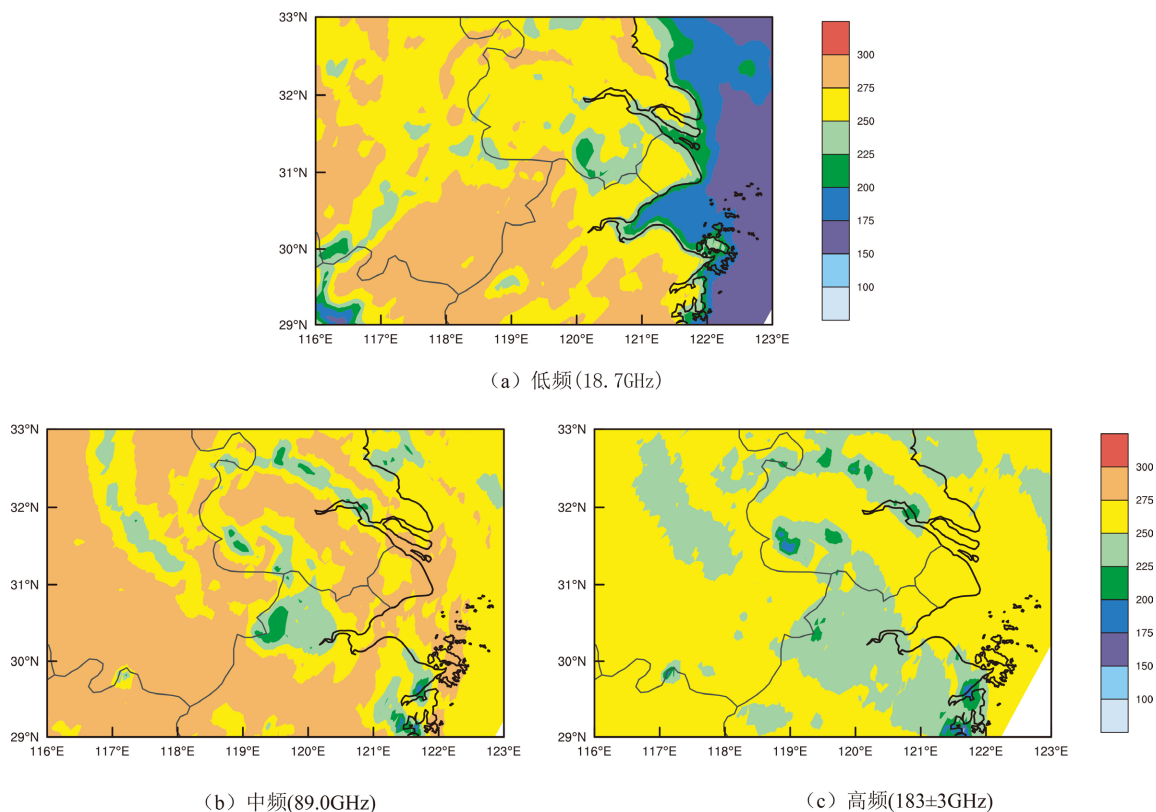
化明显, 说明层云性降水云粒子在此高度层有较强的水凝物粒子转化率。



**Figure 7.** Surface precipitation rate (a) and precipitation types (b) in “In-Fa” typhoon area  
**图 7.** “烟花”台风区域近地面降水率(a)和降水类型分布(b)

### 3.5. 亮温与云水、云冰路径分布特征

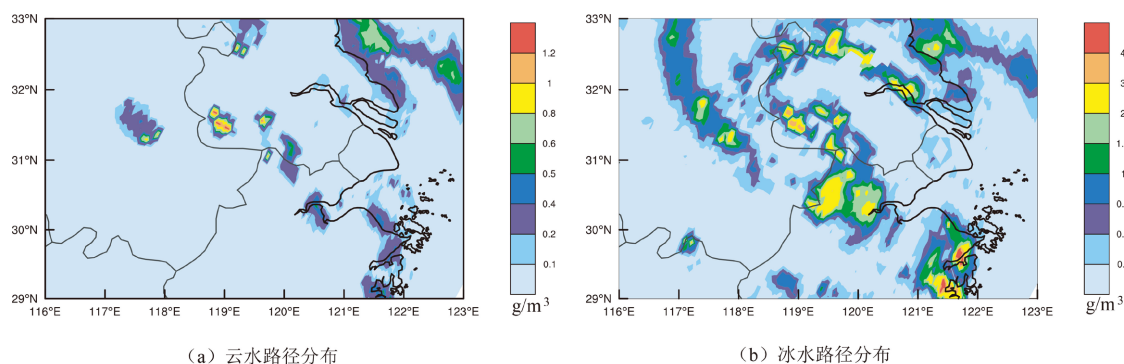
GPM 搭载的 GMI 微波辐射计相较测雨雷达 DPR 的探测范围较广, 能提供较全面的降水云信息。根据微波辐射不同通道探测的亮温特性, 分别选用低频(18.7 GHz)、中频(89.0 GHz)、高频( $183 \pm 3$  GHz)进行分析。



**Figure 8.** Microwave radiation brightness temperature of precipitation cloud system of “In-Fa” typhoon: (a) Low frequency (18.7 GHz); (b) Intermediate frequency (89.0 GHz); (c) High frequency ( $183 \pm 3$  GHz)  
**图 8.** “烟花”台风降水云系微波辐射亮温: (a) 低频(18.7 GHz); (b) 中频(89.0 GHz); (c) 高频( $183 \pm 3$  GHz)



低频微波辐射亮温显示,此次降水过程亮温基本在 250 K 以上,最大可达 280 K,根据低频微波亮温水粒子越多则亮温越高的特性,表明强降水区域的水粒子含量较多,尤其是台风主体区域;中频辐射亮温可反映降水云冰粒子状态且与冰粒子含量成反比,由图 8(b)可见,台风眼壁、东南象限的台风外围云系的亮温相较周围有明显下降,说明该区域有较多冰粒子存留[13];高频辐射亮温能有效识别冰晶,冰晶层越厚亮温越低,其分布特征与中频通道较一致,在台风眼壁存在亮温最低值。图 9 为云水路径和冰水路径分布特征,云水含量大值区仍位于台风眼壁,水汽充沛;冰水路径与中、高频辐射亮温表征相一致,均较好体现了云冰粒子分布特性。综合来看,台风影响区域均有丰富冰水混合物存留,说明降水云滴的有效碰并增长十分活跃,对地面强降水的形成有一定的正向贡献。



**Figure 9.** Distribution of cloud water path (a) and ice water path (b) in precipitation cloud system of “In-Fa” typhoon  
**图 9.** “烟花”台风降水云系的云水路径(a)与冰水路径(b)分布情况

#### 4. 结论

本文利用 GPM 资料分析了 2021 年 7 月 27 日夜间“烟花”台风的降水率分布、宏微观垂直结构、雨顶高度及云顶亮温的分布特征,以期深入了解台风的降水结构,尤其是在台风减弱阶段带来的持续强降水原因,结论如下:

- 1) 台风雨带垂直伸展高,雨顶高度集中在 5~11 km,在 6~7 km 处达到峰值,最大伸展高度超过 13 km, 20~40 mm/hr 的雨强落区基本对应 6~10 km 的雨顶高度,位于台风眼壁处。
- 2) 两个强雨区均对应 50 以上的粒子浓度,相较而言,台风眼壁处水凝物粒子直径更大,在 1.5~1.9 mm,台风外围处水凝物粒子直径在 1.5 mm 以内,但其粒子浓度最大在 55 以上,这种高浓度的环境条件有利于降水粒子碰并聚合和直径增长,降水有加强之势。
- 3) 位于台风眼壁的降水率大值区多数由对流性降水所组成,少部分层云性降水;其次位于台风西南象限的外围螺旋雨带中,对流性降水比重减小,但仍带来 15 mm/hr 以上的降水量。
- 4) 低频(18.7 GHz)、中频(89.0 GHz)、高频( $183 \pm 3$  GHz)微波辐射亮温显示,台风影响区域均有丰富冰水混合物存留,降水云滴的有效碰并增长活跃,对地面强降水的形成有一定的正向贡献。

#### 基金项目

湖州市科技计划项目(2022GZ60)。

#### 参考文献

- [1] 陈联寿. 热带气象灾害及其研究进展[J]. 气象, 2010, 36(7): 101-110.
- [2] Hobbs, P.V. (1989) Research on Clouds and Precipitation: Past, Present, and Future, Part I. *Bulletin American Meteorological Society*, 70(1): 1-10.

- 
- rological Society*, **70**, 282-285. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-70.3.282>
- [3] Houze Jr., R.A. (1982) Cloud Clusters and Large-Scale Vertical Motions in the Tropics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **60**, 396-410. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.60.1\\_396](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.60.1_396)
- [4] 王在志, 闫敬华. 水成物分析及在数值模式中的应用综述[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 85-89.
- [5] Das, S. and Maitra, A. (2016) Vertical Profile of Rain: Ka Band Radar Observations at Tropical Locations. *Journal of Hydrology*, **534**, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.053>
- [6] Conway, J.W. and Zrnić, D.S. (1993) A Study of Embryo Production and Hail Growth Using Dual-Doppler and Multiparameter Radars. *Monthly Weather Review*, **121**, 2511-2528. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121%3C2511:ASOEP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121%3C2511:ASOEP%3E2.0.CO;2)
- [7] Shenk, W.E. (2010) Cloud Top Height Variability of Strong Convective Cells. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **13**, 917-922. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1974\)013%3C0917:CTHVOS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1974)013%3C0917:CTHVOS%3E2.0.CO;2)
- [8] 李南, 卢美圻. 星载测雨雷达简介[J]. 科教文汇, 2015(27): 175-177.
- [9] Chandrasekar, V. and Le, M. (2015) Evaluation of Profile Classification Module of GPM-DPR Algorithm after Launch. 2015 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Milan, 26-31 July 2015, 5174-5177. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326999>
- [10] 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.
- [11] 方勉, 何君涛, 符永铭, 等. 基于 GPM 卫星降水产品对 1808 号超强台风“玛利亚”降水结构的分析[J]. 大气科学学报, 2019, 42(6): 845-854. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181101001>
- [12] 顾震潮, 詹丽珊. 起伏条件下云雾的重力碰并生长[J]. 气象学报, 1962(4): 37-43.
- [13] 徐华英, 顾震潮. 起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水[J]. 气象学报, 1963(1): 110-116.