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GPM DPR资料的浙东不同地形下台风降水垂直结构研究

逯博延 翁之梅 俞涵婷 张灵杰

Study on the vertical structure of typhoon precipitation over different terrains in eastern Zhejiang based on GPM DPR data

LU Boyan，WENG Zhimei，YU Hanting，ZHANG Lingjie

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-157

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

多卫星融合降水产品对2015—2020年登陆浙江台风降水的监测能力评估

Evaluation of monitoring ability of the integrated multi-satellite retrievals for precipitation during typhoon landing in Zhejiang from 2015 to 2020

暴雨灾害. 2023, 42(1): 57-66 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-015

台风“烟花”影响浙江期间GPM卫星降水产品的评估及订正

Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during Typhoon "In-Fa" affecting Zhejiang

暴雨灾害. 2023, 42(6): 704-715 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-054

基于星载测雨雷达探测资料的青藏高原东南坡降水个例分析

Case study of precipitation over southeast slope of Tibetan Plateau based on TRMM PR data

暴雨灾害. 2022, 41(3): 276-289 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.004

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

Rainstorm structure of a supercell cloud occurred in Chongqing in May 2018 measured by GPM DPR and GMI

暴雨灾害. 2022, 41(1): 1-14 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.001

微雨雷达观测的襄阳地区降水垂直结构特征

Vertical structure characteristics of precipitations in Xiangyang observed by micro rain radar

暴雨灾害. 2025, 44(2): 226-235 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-130

基于GPM与ERA5数据的北太平洋冬季风暴路径降水个例分析

A case study of precipitation along the winter storm track in the North Pacific based on the GPM and ERA5 data

暴雨灾害. 2022, 41(5): 525-535 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-256

关注微信公众号，获得更多资讯信息

逯博延,翁之梅,俞涵婷,等.2026.基于 GPM DPR 资料的浙东不同地形下台风降水垂直结构研究[J].暴雨灾害,45(1):111−120. LU Boyan, WENG Zhimei, YU Hanting, et al. 2026. Study on the vertical structure of typhoon precipitation over different terrains in eastern Zhejiang based on GPM DPR data [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):111−120 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−157

基于 GPM DPR 资料的浙东不同地形下台风降水垂直结构研究

逯博延[1], 翁之梅[2], 俞涵婷[1], 张灵杰[3]

(1. 浙江省台州市椒江区气象局, 台州 318015; 2. 浙江省台州市气象局, 台州 318001;
3. 浙江省台州市三门县气象局, 台州 317100)

摘　要: 基于全球降水观测卫星 (Global Precipitation Measurement, GPM) 星载双频降水雷达 (Dual-frequency Precipitation Radar, DPR) 资料, 探讨浙东平原、丘陵和山地三种不同地形下台风外围环流降水阶段和台风眼壁降水阶段下, 对流云降水和层状云降水的垂直结构特征。结果表明: (1) 浙东台风回波顶高度低于 6 km 左右 (接近冻结层高度) 时, 雷达反射率因子中心高度随地形抬升而升高, 回波顶高度和降水率呈显著正相关; 当回波顶高度超过 6 km 时, 回波顶高度与降水率的相关性减弱。台风对流云降水的回波顶高度分散, 而台风层状云降水的回波顶高度整体较为集中, 并分布在较高的高度上。(2) 台风对流云降水的高频中心主要分布在中低层大气中, 对应的最大降水粒子直径较大, 粒子数浓度较小, 雨滴碰撞合并作用强。台风层状云降水的雷达反射率因子则在垂直方向上分布较广, 云系旺盛且结构紧密, 但最大降水粒子直径较小, 强度弱于对流云降水。随着地形高度升高, 台风层状云降水雷达反射率因子中心高度下降, 台风对流云降水中心则逐渐升高。(3) 随着地形抬升, 雷达反射率因子极值在冻结层附近的高度有明显升高, 两类降水的粒子数浓度均出现下降, 山地、丘陵地形下的降水粒子直径明显大于平原地形, 表明地形作用导致大气不稳定性上升, 水汽垂直输送作用以及雨滴碰撞合并效应显著。研究结果为理解地形对台风降水垂直结构的调控机制提供三维观测依据和数据支撑。

关键词: 全球降水观测卫星; 星载双频降水雷达资料; 雷达反射率因子; 地形; 降水垂直结构

中图法分类号: P412.27　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−157

Study on the vertical structure of typhoon precipitation over different terrains in eastern Zhejiang based on GPM DPR data

LU Boyan[1], WENG Zhimei[2], YU Hanting[1], ZHANG Lingjie[3]

(1. *Taizhou Jiaojiang Meteorological Bureau of Zhejiang*, *Taizhou* 318015; 2. *Taizhou Meteorological Bureau of Zhejiang*, *Taizhou* 318001; 3. *Taizhou Sanmen Meteorological Bureau of Zhejiang*, *Taizhou* 317100)

Abstract: Using data from the Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) onboard Global Precipitation Measurement (GPM) mission, this study investigates the vertical structure characteristics of typhoon precipitation over three different terrains in Zhejiang East Plain, hilly areas, and mountainous regions, with a focus on convective and stratiform precipitation during the eyewall precipitation phase and the outer circulation precipitation phase of typhoons. The results are as follows. (1) When the typhoon echo top height in Zhejiang East is below approximately 6 km (close to the freezing level), the height of the radar reflectivity factor center increases with the uplift of terrain, and there is a significant positive correlation between echo top height and precipitation rate. When the echo top height exceeds 6 km, the correlation between echo top height and precipitation rate weakens. The echo top heights of convective precipitation in typhoons are more dispersed, while that of stratiform precipitation is relatively concentrated at higher altitudes. (2) The high-frequency center of convective precipitation in typhoons is mainly distributed in the lower and middle atmosphere, corresponding to larger maximum particle diameters, lower particle number concentrations, and strong raindrop collision and coalescence effects. The radar reflectivity factor of stratiform precipitation in typhoons is widely distributed in the vertical direction, with vigorous cloud systems characterized by compact structures, but smaller maximum precipitation particle diameters and weaker intensity compared to convective precipitation. As terrain height increases, the center height of the radar reflectivity factor of stratiform precipitation decreases, while that of convective precipitation gradually increases. (3) As the terrain uplifts, the maximum value of the radar reflectivity factor near the freezing level shows a significant

收稿日期: 2024−08−19; **定稿日期**: 2025−01−12

资助项目: 浙江省气象局科技计划项目 (2023YB27); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2025M04); 浙江省气象局一般项目 (2023YB25)

第一作者: 逯博延, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: qzcbm55@163.com

通信作者: 翁之梅, 主要从事台风、暴雨中尺度分析与预报。E-mail: amander@163.com

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

increase in height, with decreases in the particle number concentration of both precipitation types. The precipitation particle diameter in mountainous and hilly terrains is significantly larger than that in the plain terrain, indicating that the terrain effect intensifies atmospheric instability, strengthens the vertical transport of water vapor, and enhances the raindrop collision and coalescence effects. This study provides three-dimensional observational evidence and data support for understanding the regulatory mechanism of terrain on the vertical structure of typhoon precipitation.

Key words: Global Precipitation Measurement; Dual-frequency Precipitation Radar; radar reflectivity factor; terrain; vertical structure of precipitation

引　言

近岸、登陆台风对天气有着强烈而深远的影响，台风在靠近、登陆以及远离过程中均可能会与其他天气系统相互作用，引发局地强降水。地形抬升作用和水汽辐合作用对台风降水有极强的增幅效应。以往由于观测资料的稀缺，对不同地形下台风降水的分析往往存在局限性，具体表现在对降水类型、降水垂直结构以及其微物理特征等一系列精细化降水特征进行分析时缺少观测资料佐证。借助新一代多普勒天气雷达、卫星资料以及高分辨率数值预报模式能够解决这些问题。全球降水观测卫星 (Global Precipitation Measurement, GPM) 是热带降雨测量任务 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 之后的新一代全球降水卫星，是由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和日本航空航天与探索局 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 合作发起的全球降雨观测计划。GPM 卫星搭载全球首个星载双频降水雷达 (Dual-frequency Precipitation Radar, DPR)，有 Ka 和 Ku 两个波段。该双频雷达相比 TRMM 单频降水雷达而言，具有更高灵敏度、更广覆盖范围，并可提供更精确的降水微观结构信息 (Prakash et al., 2016; Kim et al., 2016; Sharifi et al., 2017)。目前的评估工作已证实 GPM 卫星降水产品具有良好的产品精度与适用性，其在夏季反演精度最高 (蔡志颖等, 2023)。

国内外学者在台风降水结构和微物理过程等方面上开展了诸多研究，以更深入地理解台风降水过程。Yuter 和 Houze (1995) 提出了一种用于风暴特性分布统计的等高频率分布图 (Contoured Frequency by Altitude Diagram, CFAD)，其在揭示风暴结构方面有较好效用。基于 Yuter 和 Houze (1995) 的工作，Hence 和 Houze (2016) 通过对风暴的回波强度、亮带结构和最大回波顶高度的统计发现，眼壁右下切区更容易产生对流云降水，并揭示了热带气旋外雨带与眼壁微物理特征的显著差异，眼壁降水较外雨带和眼区分布更广，外雨带和眼区产生层状云降水，而眼壁降水为对流云降水或混合降水。卫星雷达反演数据提供了丰富且准确的降水物理量信息，基于卫星雷达等反演数据的台风降水垂直结构特征研究也已广泛开展。陈涛等 (2021) 使用 GPM 卫星遥感反演数据对台风“利奇马”进行分析发现，眼墙区雨滴有效直径更大、雨滴数密度更高，有利于形成高强度降水。气旋的垂直结构与降水密切相关，Zhang 等 (2020) 研究表明温带气旋不同生命阶段对降水的影响程度不同，发展阶段影响最大，其次是成熟阶段，消亡阶段影响最弱。降水类型是决定降水特征的重要因素之一，它影响着降水强度 (Cao et al., 2013)，不同降水类型下的降水垂直结构及其机制也不同。翁之梅等 (2020) 基于多源卫星数据发现，台风“利奇马”登陆前强雨带非对称分布与垂直风切变作用密切相关，登陆前垂直风切变减弱会导致强降水带偏向环流向岸侧。王立羽和傅云飞 (2022) 基于 GPM 卫星资料对一次北太平洋温带气旋过程进行分析表明，该过程 3 个降水片段的雷达反射率因子垂直剖面上均存在明显的冰水转换层，各片段有效粒子半径强度分布与雷达反射率因子强度分布具有一致性。

地形可对近地层天气系统造成显著影响，地形抬升作用和水汽辐合效应均会引起降水增强。浙江作为我国受台风影响最为严重的省份之一，省内复杂多样的地形对台风系统的发展有着显著影响 (李瑞英等, 2024)，对台风降水结构进行研究具有重要的实际意义。为探究不同地形下台风降水的垂直结构特征，本文筛选整理出在浙东地区造成强降水的台风个例，基于全球地形高程数据和星载雷达反演高程数据将浙东地形分为平原、丘陵、山地三类，在此基础上使用 GPM DPR 反演资料，探究三种不同地形下台风外围环流降水阶段和台风眼壁降水阶段对流云降水和层状云降水的垂直结构特征，以期为不同地形下台风降水机制的研究提供科学借鉴。

1 研究区域概况及资料与方法

1.1 研究区域概况

本文研究区域为浙东地区 (120.5°—122.5°E, 28°—30°N, 图 1 中红框区域)。浙江地势为西高东低特征，西侧一带山地和丘陵众多，东侧为海岸线，主要包括浙东丘陵、宁绍平原和温台平原等地形。本文根据浙江东部地形高程数据，将研究区域地形划分为平

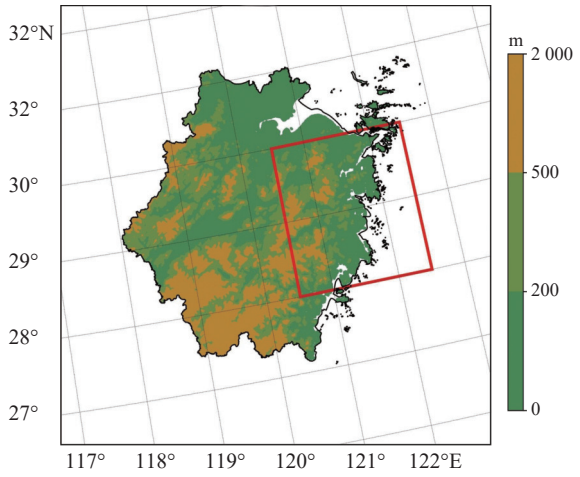


图 1 浙江东部地形高程图 (红框为研究区域)

Fig. 1 Topographic elevation map of Eastern Zhejiang with main research areas highlighted in red box

原 (0≤海拔<200 m)、丘陵 (200 m≤海拔<500 m)、山地 (海拔≥500 m) 三类。

1.2 资料说明

本文采用的资料为 NASA 发布的 GPM DPR 反演高程数据、美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 发布的全球地形高程数据 (Earth Topography, ETOPO)。本文选取 GPM Level2 2ADPR V07 版本双频联合反演产品 FS 扫描的逐轨降水信息, 时间段为 2014—2024 年, 垂直分辨率 250 m, 水平分辨率 5 km, 使用衰减订正后的雷达反射率因子、粒子谱特征、回波顶高度、冻结层高度、降水率等多种物理量。其中雷达反射率因子、回波顶高度、降水率等用于表征降水强度及其演变特征, 粒子谱特征、冻结层高度等用于分析台风降水微物理特征及其垂直结构。

1.3 研究方法

1.3.1 台风事件筛选

台风眼壁降水定义为发生在台风眼壁附近的降水, 台风外围环流降水定义为发生在台风螺旋雨带及其外围由台风环流水汽输送引起的降水 (陈联寿, 2006)。由于 GPM 逐轨道卫星雷达对固定区域的扫描存在时间上的探测间隔, 本文对 2014—2024 年在浙江东部地区造成强降水的 28 个台风个例进行匹配数据筛选, 共筛选出 GPM DPR 探测到的 15 次台风外围环流降水和 1 次台风眼壁降水, 如表 1 所示。后文的分析均基于表 1 的台风降水进行。

由于 GPM DPR 资料中有数据记录的台风眼壁降水个例较少, 本文仅分析过程强度较强的台风“利奇马”的眼壁降水。GPM DPR 获取的台风“利奇马”降水片段正好接近其登陆阶段, 该阶段台风强度高、结构完整且云系范围广, GPM 卫星得以收集到完整的台风本体降水信息 (图 2), 故该台风本体降水片段具有较好的代表性。

表 1 2014—2024 年 GPM DPR 探测的影响浙江东部的台风及其降水情况

Table 1 Typhoon and precipitation detected by GPM DPR affecting eastern Zhejiang from 2014 to 2024

台风名称	台风编号	降水阶段	降水发生日期/(年.月.日)
苏迪罗	1513	外围环流降水	2015.8.10
杜鹃	1521	外围环流降水	2015.9.30
莫兰蒂	1614	外围环流降水	2016.9.13
鲶鱼	1617	外围环流降水	2016.9.29
海马	1622	外围环流降水	2016.10.20
纳沙	1709	外围环流降水	2017.7.29
海棠	1710	外围环流降水	2017.8.1
玛莉亚	1808	外围环流降水	2018.7.10
玛莉亚	1808	外围环流降水	2018.7.11
温比亚	1818	外围环流降水	2018.8.17
利奇马	1909	眼壁降水	2019.8.9
烟花	2106	外围环流降水	2021.7.22
灿都	2114	外围环流降水	2021.9.12
梅花	2212	外围环流降水	2022.9.12
梅花	2212	外围环流降水	2022.9.14
杜苏芮	2305	外围环流降水	2023.7.28

1.3.2 降水类型

基于雷达遥感探测的亮带信息, GPM 2ADPR 采用全新的 DFRm 方案 (Le and Chandrasekar, 2013a, 2013b; Le et al., 2013)来区分降水类型, 分为对流云降水、层状云降水和其他降水。具体分类如下: 检测到亮带的降水扫描点通常被认为是层状云降水, 但如果亮带附近的雷达反射率因子大于 39 dBz (对流性阈值), 则被归类为对流云降水; 未检测到亮带的降水扫描点, 若雷达反射率因子在回波顶以下超过 39 dBz, 则被分类为对流云降水; 其他情况被归类为其他降水。台风外围环流降水阶段 (共 15 次, 见表 1), GPM DPR 星载雷达累计探测到 845 个对流云降水格点和 971 个层状云降水格点; 台风眼壁降水阶段 (台风“利奇马”降水), DPR 雷达识别到 373 个对流云降水格点和 626 个层状云降水格点, 尽管样本数量相对较少, 但单次有效降水更加密集, 具有一定参考意义。

1.3.3 归一化等高频率分布和联合概率密度分布

等高频率分布能够有效揭示降水的垂直结构, 各频率除以分析区域内最大绝对频率即归一化等高频率分布 (Normalized Contoured Frequency by Altitude Diagram, NCFAD) (Houze et al., 2007)。通过计算联合概率密度分布 (Joint Probability Density Function,

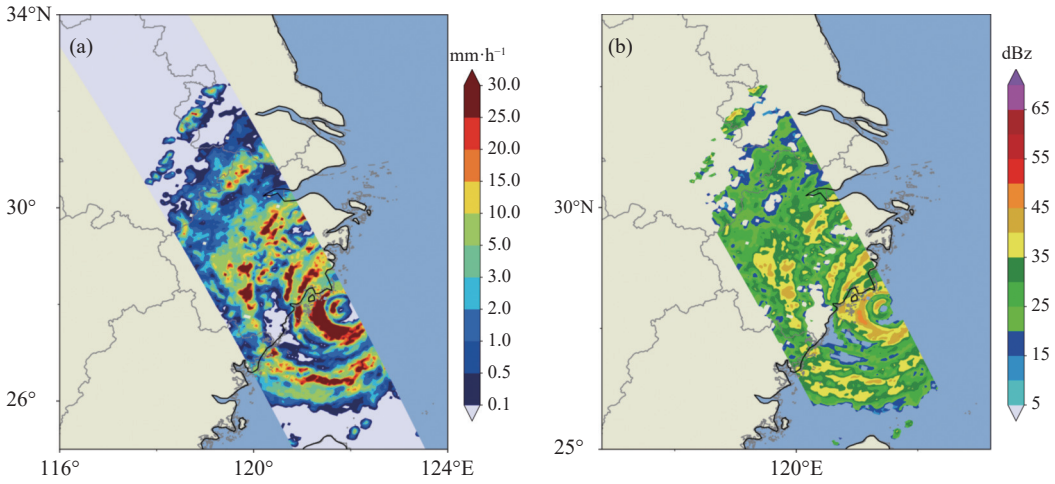


图 2 2019 年 8 月 9 日台风“利奇马”眼壁降水阶段近地面降水率 (a) 和 2—5 km 高度上的雷达反射率因子 (b)

Fig. 2 The (a) near-surface precipitation rate, (b) radar reflectivity factor at an altitude of 2-5 km during the eyewall precipitation phase of Typhoon Lekima on August 9, 2019

JPDF) 可得到 NCFAD, 进而分析台风降水的垂直结构特征。以雷达反射率因子和海拔高度为例, 假设高度为 Y, 雷达反射率因子为 X, 变量 (X, Y) 看成是平面上随机点的坐标, 那么分布函数 $F(x, y)$ 在 (x, y) 处的函数值就是随机点 (X, Y) 落在以 (x, y) 为顶点且位于该点左下方的无穷矩形域内的概率。

2 台风降水结构特征分析

2.1 台风不同降水阶段的降水率和回波顶高度特征

短时强降雨是一种强对流天气现象, 指短时间内产生剧烈降雨的天气。国家级天气预报业务规范中将小时雨量超过 50 mm 的降水事件定义为强短时强降雨事件 (俞小鼎, 2013; 郑永光等, 2017; 罗贵东等, 2024)。在台风外围环流降水和眼壁降水阶段中, 层状云降水强度 (图 3b、d) 偏弱, 降水率在 0~40 mm·h^{-1} 区间内, 而对流云降水 (图 3a、c) 中强短时强降雨事件 (降水率>50 mm·h^{-1}) 比例明显大于层状云降水。回波顶高度与降水率存在着一定的相关性。对表 1 统计的 16 次台风降水进行分析后发现: 在较低的回波顶高度区间内 (回波顶高度低于 6 km 左右), 对流云降水的回波顶高度和降水率呈显著的正相关; 当回波顶高度超过 6 km (接近冻结层高度) 时, 对流云降水的降水率在回波顶高度较高的情景下同样较大, 但其回波顶高度与降水率的相关性减弱。层状云降水的情形则有较大不同, 层状云降水的回波顶高度普遍集中在较高的高度上, 该高度以下回波顶高度对降水率的影响较弱。傅云飞等 (2012) 研究指出, 夏季亚洲对流云降水和层状云降水的回波顶平均高度均随着地面平均降水率的增大而升高, 二者遵从二次函数。本文研究发现, 台风降水在低回波顶高度时与降水率的相关程度明显强于中国东部地区降水回波顶高度和降水率的平均相关程度, 这也进一步表明台风过程具有更强的降水效率。

2.2 三类地形下台风降水雷达反射率因子垂直分布特征

分析台风降水雷达反射率因子垂直特征 (图 4) 可知, 在台风眼壁降水阶段, 对流云降水的雷达反射率因子高频中心分布在近地面层, 随地形高度升高而不断抬升 (图 4a、c、e); 层状云降水的雷达反射率因子在 0—10 km 的高度范围内均有广泛分布, 但随着地形高度升高, 高频区域所在的高度有所下降 (图 4b、d、f)。这是因为台风本体的层云云系旺盛, 在各高度上均具有较强的雷达反射率因子, 但随着地形高度升高, 台风云系发展及水汽输送受到地形阻碍而有所减弱; 在对流云降水中, 地形抬升引起上升气流增强, 雨滴在下落过程中碰撞合并作用加剧, 进而导致雷达反射率因子中心高度的升高。

台风外围环流降水阶段, 平原地形下对流云降水 (图 5a) 在较低高度显示出高频分布, 高频中心的雷达反射率因子约在 20 dBz, 集中在 2—4 km 高度。丘陵地形下对流云降水 (图 5c) 的雷达反射率因子中心随地形的抬升略有上移, 主要集中在 2—5 km 高度, 中心值约为 25 dBz。山地地形下对流云降水 (图 5e) 的雷达反射率因子中心随地形高度升高而上升。平原地形下层状云降水 (图 5b) 的雷达反射率因子从地面至约 9 km 的高度均有相对较高的分布频率, 且高频中心出现在 6—7 km 高度, 中心值在 20~25 dBz, 表明台风的层云云系在垂直方向上较为旺盛。丘陵 (图 5d) 和山地 (图 5f) 地形下层状云降水的雷达反射率因子高频中心的高度相对平原地形有所下降, 但中心值有所增大。

本文研究发现, 三类地形下台风外围环流降水阶段平均回波顶高度均低于台风眼壁降水阶段。此

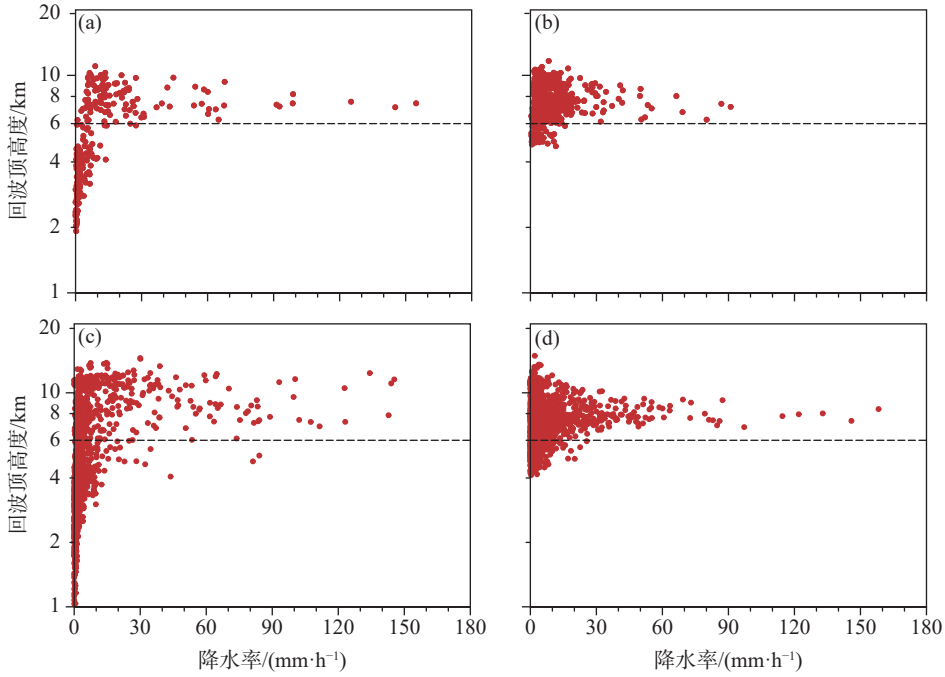


图 3 浙东台风眼壁降水阶段 (a, b) 和外围环流降水阶段 (c, d) 对流云降水 (a, c)、层状云降水 (b, d) 的地表降水率-回波顶高度散点分布 (纵轴为对数坐标轴)

Fig. 3 Scatter distribution of surface precipitation rate versus echo top height for (a, c) convective precipitation and (b, d) stratiform precipitation during (a, b) the eyewall precipitation phase and (c, d) the outer circulation precipitation phase of typhoons in eastern Zhejiang (The vertical axis is in logarithmic scale)

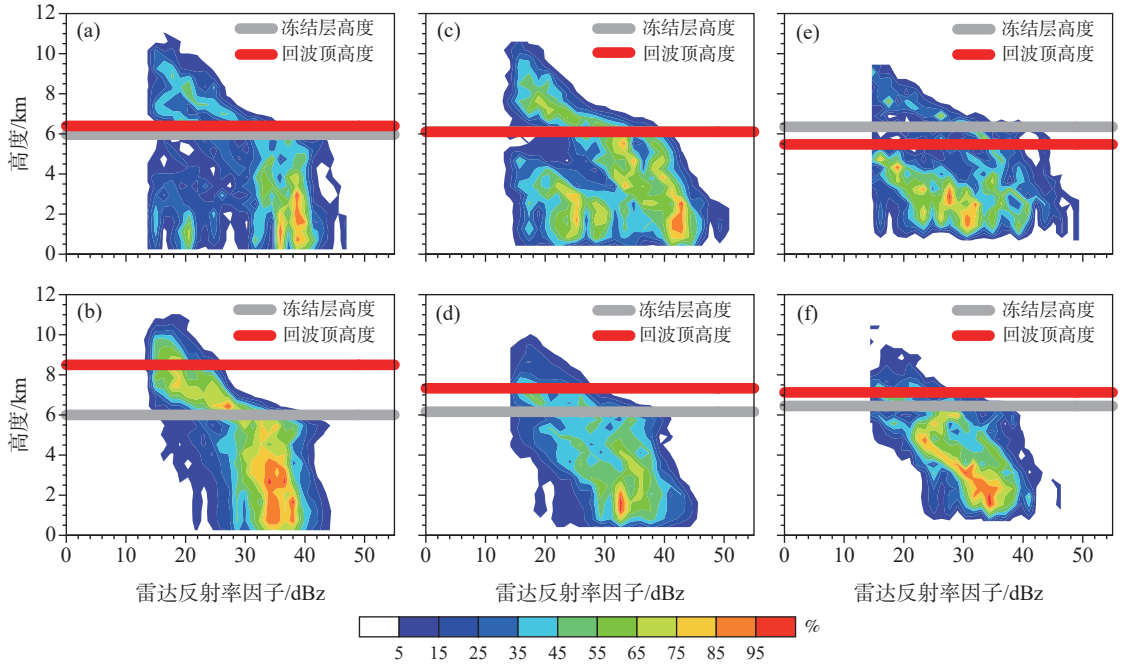


图 4 平原 (a, b)、丘陵 (c, d)、山地 (e, f) 地形下浙东台风眼壁降水阶段对流云降水 (a, c, e) 和层状云降水 (b, d, f) 随海拔高度分布的雷达反射率因子概率密度 (灰色实线为冻结层高度, 红色实线为回波顶高, 下同)

Fig. 4 Probability density of radar reflectivity factor distribution with altitude for (a, c, e) convective precipitation and (b, d, f) stratiform precipitation during the eyewall precipitation phase of typhoons in eastern Zhejiang over (a, b) plain, (c, d) hilly, and (e, f) mountainous terrains (the gray solid line denotes the freezing level height, and the red solid line denotes the echo top height, the same hereinafter)

外, 对流云降水的回波顶高度集中在 5.8—6.1 km 左右, 而层状云降水回波顶高度集中在 7.0—8.2 km, 台风眼壁降水阶段层状云降水的回波顶平均高度要略高于对流云降水, 这与傅云飞等 (2012) 对 2005 年 7 月 17 日台风降水个例的分析结论较为一致。

与台风眼壁降水阶段相比, 台风外围环流降水

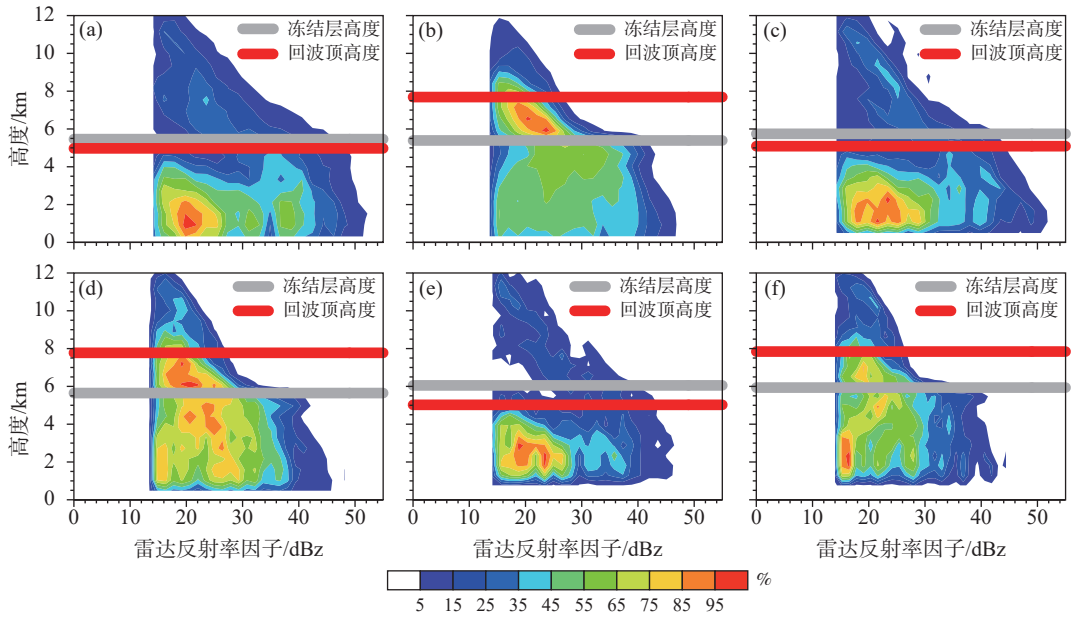


图 5 同图 4, 但为台风外围环流降水阶段随海拔高度分布的雷达反射率因子概率密度 (a—f)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for (a-f) probability density of radar reflectivity factor distribution with altitude during the outer circulation precipitation phase of typhoon

阶段的雷达反射率因子高概率区分布在相对较低的高度, 这与台风本体降水强度明显强于台风外围环流降水强度密切关系。降水粒子自回波顶高度下落, 雷达反射率因子往往在冻结层附近达到极值。地形高度越高, 降水粒子下落到冻结层附近, 经过冰晶融化和碰撞合并, 雷达反射率因子达到极值时对应的高度也越高 (图 6a、b), 相应的雨云高度也会越高。由于零度层高度无明显变化, 故该特征表明地形抬升作用使得水汽在垂直方向上的输送增强, 进而在相对更高的高度促进降水粒子生成和发展。此外, 台风外围环流降水阶段, 对流云降水在冻结层高度 (5—6 km) 以下的整体降水强度与层状云降水相近, 而在该高度以上明显强于层状云降水 (图 6b)。

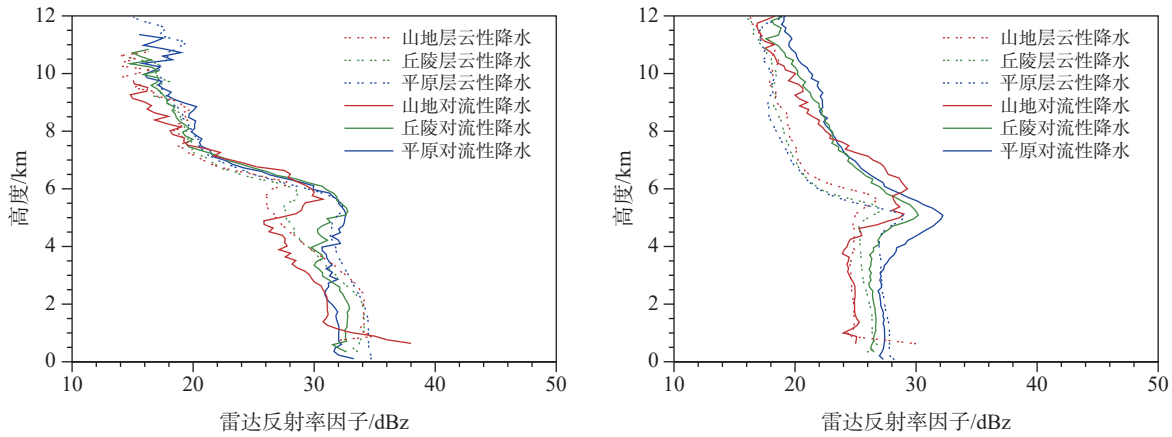


图 6 平原、丘陵、山地地形下浙东台风眼壁降水阶段 (a) 和外围环流降水阶段 (b) 对流云降水、层状云降水的雷达反射率因子垂直廓线

Fig. 6 Radar reflectivity factor vertical profiles of convective and stratiform precipitation during (a) typhoon eyewall precipitation phase and (b) outer circulation precipitation phase for plain, hilly areas, and mountainous regions in eastern Zhejiang

2.3 三类地形下台风降水雨滴数浓度的垂直分布特征

图 7 显示三类地形下台风眼壁降水阶段雨滴数浓度 (N_w) 的概率密度, 分析可知, 平原地形下对流云降水 (图 7a) 的 N_w 中心分布在近地面层约 0—2 km 高度; 与平原相比, 丘陵 (图 7c) 和山地 (图 7e) 地形下对流云降水的 N_w 中心有所上升。这反映地形对对流活动的发展具有促进作用, 进而在更高层形成了降水中心。平原地形下层状云降水 (图 7b) 的 N_w 在较大的高度范围 (约 0—8 km) 均有较高的概率, 丘陵 (图 7d) 和山地 (图 7f) 地形下层状云降水的 N_w 高

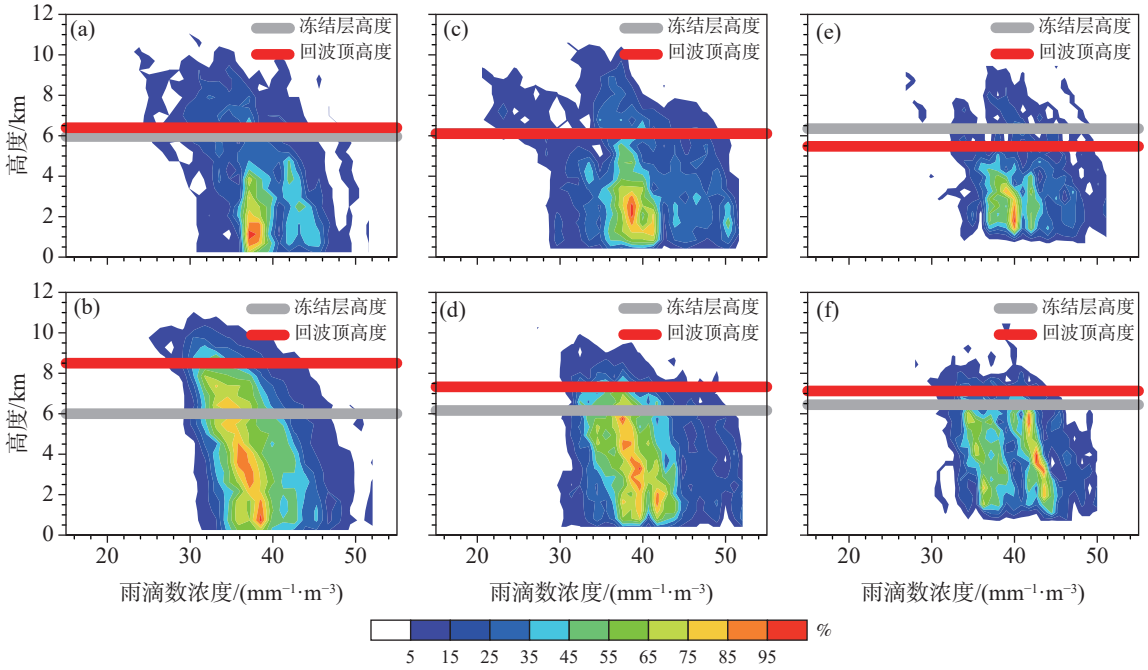


图 7 平原 (a, b)、丘陵 (c, d)、山地 (e, f) 地形下浙东台风眼壁降水阶段对流云降水 (a, c, e) 和层状云降水 (b, d, f) 随海拔高度分布的雨滴数浓度概率密度

Fig. 7 Probability density of raindrop number concentration distribution with altitude for (a, c, e) convective precipitation and (b, d, f) stratiform precipitation during the eyewall precipitation phase of typhoon for (a, b) plain, (c, d) hilly areas, (e, f) mountainous regions in eastern Zhejiang

频区域的高度则有所降低。同类地形下对流云降水的 N_w 中心值与层状云降水相比较小, 说明对流云降水中雨滴碰撞合并过程较强。

在台风外围环流降水阶段, 平原地形下对流云降水 (图 8a) 的 N_w 高频值出现在较低的高度, 中心值 38 $mm^{-1}·m^{-3}$; 丘陵 (图 8c) 和山地 (图 8e) 地形下对流云降水的 N_w 高频区域则受地形影响上升至更高的高度, 且 N_w 中心对应浓度有所下降。平原地形下层状云降水 (图 8b) 的 N_w 在 0—8 km 左右的高度均有相对高频的分布, 且垂直分布较均匀。随着地形抬升, 丘陵 (图 8d) 和山地 (图 8f) 地形下层状云降水的 N_w 高频区域同样有所下降, 对应浓度也逐渐下降。综合来看, 随着地形抬升, 两类降水的 N_w 均有所下降, 表明大气不稳定性随地形抬升逐渐增强, 雨滴碰撞合并效应逐渐显著。

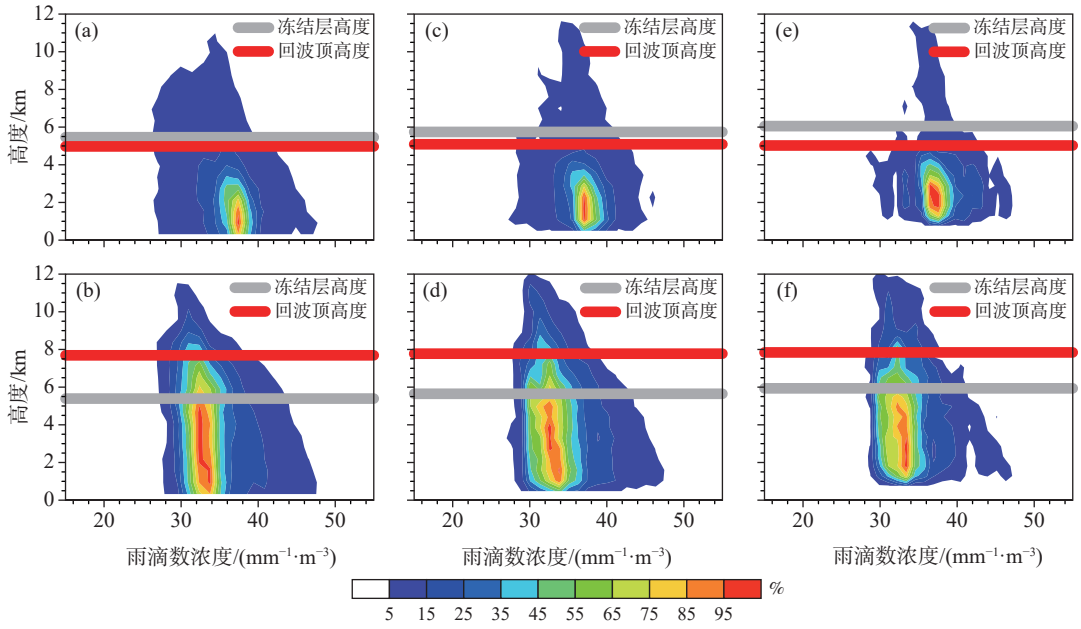


图 8 同图 7, 但为台风外围环流降水阶段随海拔高度分布的雨滴数浓度概率密度 (a—f)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for (a-f) probability density of raindrop number concentration distribution with altitude during the outer circulation precipitation phase of typhoon

2.4 三类地形下台风降水雨滴粒子质量加权平均直径的垂直分布特征

在台风眼壁降水阶段，同类地形下对流云降水的质量加权平均直径 (D_m) 集中在大气中低层，最大降水粒子直径较大 (图 9a、c、e)；而层状云降水的 D_m 垂直分布域高度明显较高，但最大降水粒子直径较小 (图 9b、d、f)。这进一步印证了对流云降水主要集中在冻结层以下的中低层大气中，且降水强度较强；而层状云降水在垂直方向上发展旺盛，但降水强度弱于对流云降水。在中低层大气中，层状云降水高频中心的粒子直径大于对流云降水 (图 9a—f)，且具有较高的粒子数浓度 (图 7a—f)，是台风眼壁降水阶段层状云降水的雷达反射率因子相对对流云降水较高 (图 6a、b) 的主要原因。

在台风外围环流降水阶段，对流云降水 D_m 高频中心对应的高度随地形高度升高而上升 (图 10a、c、e)，且丘陵、山地地形下 D_m 大于平原地形。平原地形下层状云降水 (图 10b) 垂直分布域较广，高频中心位

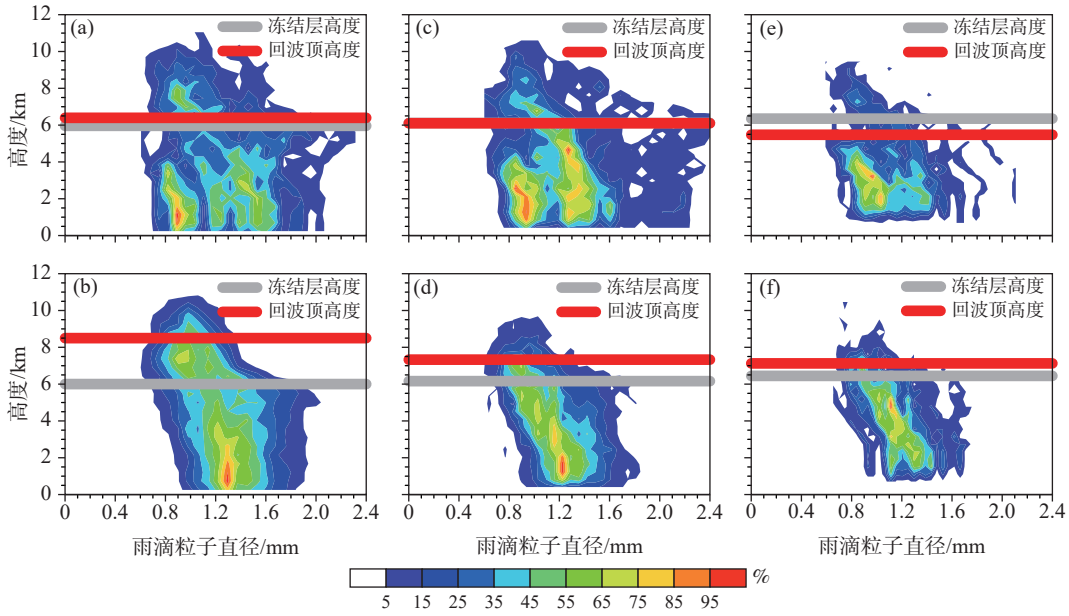


图 9 平原 (a, b)、丘陵 (c, d)、山地 (e, f) 地形下浙东台风眼壁降水阶段对流云降水 (a, c, e) 和层状云降水 (b, d, f) 随海拔高度分布的雨滴粒子直径概率密度

Fig. 9 Probability density of raindrop particle diameter distribution with altitude for (a, c, e) convective precipitation and (b, d, f) stratiform precipitation during the eyewall precipitation phase of typhoon for (a, b) plain, (c, d) hilly areas, (e, f) mountainous regions in eastern Zhejiang

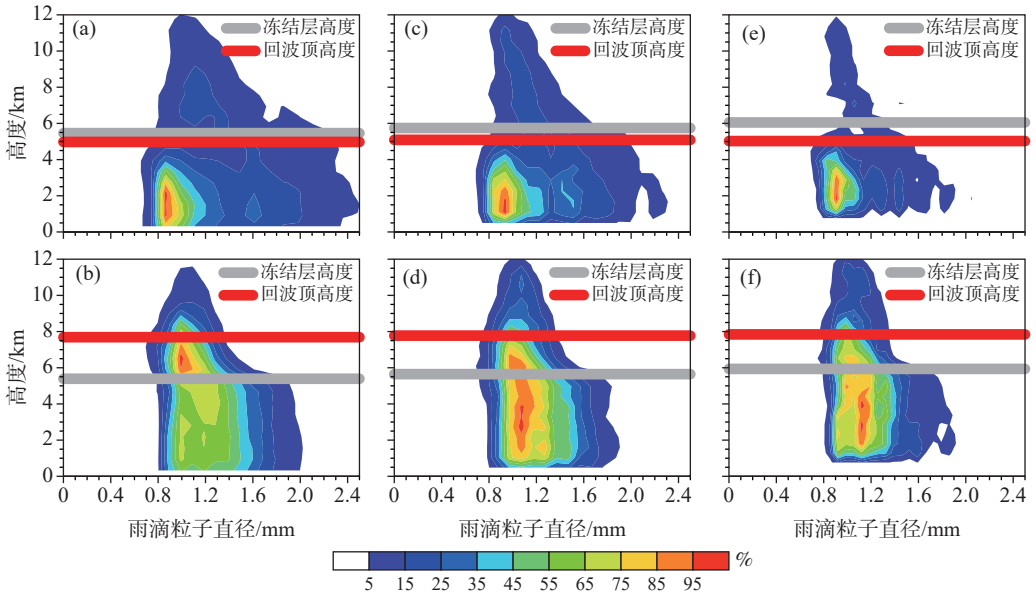


图 10 同图 9，但为台风外围环流降水阶段随海拔高度分布的雨滴粒子直径概率密度 (a—f)

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for (a-f) probability density of raindrop particle diameter distribution with altitude during the outer circulation precipitation phase of typhoon

于 6—8 km 高度范围内, 高频中心对应的 D_m 约为 1 mm 左右; 随着地形高度升高 (图 10d、f), D_m 高频中心对应高度逐渐下降, 对应 D_m 大小有所增长。同地形下对流云降水在近地面层的最大降水粒子直径均大于层状云降水, 受地形抬升影响, 更强的上升气流引起降水粒子碰撞合并, 两类降水的粒子直径也随着地形高度升高而增大。综上, 浙东台风降水的雨粒子谱特征中降水雷达反射率因子的垂直分布特征主要由 D_m 决定, N_w 则是次要因素, 这与杨可和傅云飞 (2023) 研究结论一致, 表明台风降水的雷达反射率因子对降水粒子直径变化的响应更为显著。

3 结论与讨论

本文基于 GPM DPR 资料探讨了浙东平原、丘陵、山地三种地形下台风外围环流降水阶段和眼壁降水阶段的对流云降水和层状云降水的垂直结构特征。得到如下主要结论:

(1) 浙东台风降水强度主要受降水类型影响, 对流云降水强度高于层状云降水。回波顶高度较低时 (海拔 6 km 以下), 回波顶高度和降水率呈显著的正相关; 而当回波顶高度达到一定高度时, 对流云降水的回波顶高度与降水率的相关性较弱。层状云降水的回波顶高度则普遍集中在较高的高度上, 这一高度以下回波顶高度和降水率的相关性较弱。

(2) 台风对流云降水的雷达反射率因子高频中心分布在近地面层, 随地形高度升高而不断抬升, 且高频中心对应的雷达反射率因子有所增大; 层状云降水的雷达反射率因子在 0—10 km 的高度范围内均有广泛分布, 但随着地形高度升高, 雷达反射率因子高频区域所在的高度有所下降。在对流云降水中, 地形抬升引起上升气流的增强, 雨滴在下落过程中碰撞合并作用加剧, 进而导致雷达反射率因子增大, 中心高度上升; 而台风层云云系旺盛, 且结构紧密, 各高度上均具有较强的雷达反射率因子, 但随着地形高度升高, 层云发展及水汽输送受到地形阻挡, 垂直方向上的发展有所减弱。

(3) 与台风眼壁降水相比, 台风外围环流降水的雷达反射率因子高概率区域分布在相对较低的高度范围上, 中心值明显偏低, 这与台风眼壁降水强度明显强于台风外围环流降水强度密切关系。降水粒子下落到冻结层附近, 经过冰晶融化和碰撞合并, 雷达反射率因子达到极值时对应的高度越高, 相应的雨云高度也会越高, 但零度层高度无明显变化, 表明地形抬升作用使得水汽在垂直方向上的输送增强, 进而在相对更高的高度促进降水粒子生成和发展。

(4) 平原对流云降水的粒子数浓度 (N_w) 高频中心分布在近地面层, 高度约 0—2 km, 随地形高度上升, N_w 中心有所上移。平原地形下层状云降水的 N_w 在较大的高度范围 (约 0—8 km) 均有较高的概率, 但在地形较高的地区, N_w 高频区域的高度范围有所下降。总体而言, 随着地形抬升, 两类降水的 N_w 均有所下降, 意味着大气不稳定性随地形抬升逐渐增强, 雨滴碰撞合并效应逐渐显著。

(5) 同类地形下对流云降水在近地面层的最大降水粒子直径均大于层状云降水, 受地形抬升影响, 更强上升气流引起降水粒子碰撞合并, 粒子直径逐渐增大。对流云降水的质量加权平均直径 (D_m) 高频中心集中在大气中低层, D_m 较大; 层状云降水 D_m 发展旺盛, 高频中心垂直分布域高度明显较高, 但 D_m 较小。在中低层大气中, 层状云降水 D_m 的高频中心大于对流云降水, 且该高度范围内层状云降水高频中心具有较高的 N_w, 是台风眼壁降水阶段层状云降水雷达反射率因子较对流云降水较高的主要原因。

需要指出的是, 由于 GPM 卫星从 2014 年开始业务化运行, 受到 DPR 星载雷达观测样本数量的限制, 本文仅选取了近 10 a 影响浙江东部地区的台风卫星观测数据进行研究。下一步将在更大时空范围内选取台风样本, 同时结合中国气象局最新业务化运行的 FY-3G 降水观测卫星资料, 应用地面自动观测站数据和 FY-3G 卫星观测数据进行降水数据质量对比与检验, 综合评估不同降水观测卫星雷达产品在台风降水结构研究领域的应用效果。

参考文献 (References):

陈联寿.2006.热带气旋研究和业务预报技术的发展[J].应用气象学报, 17(6):672−681. Chen L S. 2006. Development of tropical cyclone research and operational forecasting techniques [J]. Journal of Applied Meteorological Science,17(6):672−681 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2006.06.005

陈涛,董林,罗玲,等.2021.台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J].气象,47(12):1433−1443. Chen T, Dong L, Luo L, et al. 2021. Characteristics of convective structure and its impact on heavy rainfall during the landing of Typhoon Lekima [J]. Meteorological Monthly,47(12):1433−1443 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000.0526.2021.12.001

蔡志颖,郑艳,段晶晶,等.2023.台风“烟花”影响浙江期间 GPM 卫星降水产品的评估及订正[J].暴雨灾害,42(6):704−715. Cai Z Y, Zheng Y, Duan J J, et al. 2023. Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during the impact of Typhoon In. fa on Zhejiang [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):704−715 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023.054

傅云飞,曹爱琴,李天奕,等.2012.星载测雨雷达探测的夏季亚洲对流与层云降水雨顶高度气候特征[J].气象学报,70(3):436−451. Fu Y F, Cao A Q, Li T Y, et al. 2012. Climatic characteristics of the storm top

altitude for the convective and stratiform precipitation in summer Asia based on measurements of the TRMM Precipitation Radar [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(3):436−451 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.037

李瑞英,吕桂恒,樊杰,等.2024.华东地区台风气候特征及危险性分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):119−125. Li R Y, Lyu G H, Fan J, et al. 2024. Climatic characteristics and risk analysis of typhoon in East China [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):119−125 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.015

罗贵东,于竹娟,肖鹏.2024.基于“配料法”的渠江流域短时强降水中尺度概念模型及物理量配置[J].高原山地气象研究,44(S1):20−28. Luo G D, Yu Z J, Xiao P. 2024. Mesoscale conceptual model and physical quantity allocation of short-term heavy rainfall in the Qujiang River Basin based on Batching method [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(S1):20−28 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.Z1.003

王立羽,傅云飞.2022.基于 GPM 与 ERA5 数据的北太平洋冬季风暴路径降水个例分析[J].暴雨灾害,41(5):525−535. Wang L Y, Fu Y F. 2022. A case study of precipitation along the winter storm track in the North Pacific based on the GPM and ERA5 data [J]. Torrential Rain and Disasters,41(5):525−535 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2020.256

翁之梅,贲海荣,高丽,等.2020.台风“利奇马”登陆前后雨带强度与结构变化特征分析[J].气象科学,40(3):325−332. Weng Z M, Ben H R, Gao L, et al. 2020. Analysis of the characteristics of rainband intensity and structural changes before and after the landing of Typhoon Lekima [J]. Meteorological Science,40(3):325−332 (in Chinese). doi:10.3969/2019jms.0074

杨可,傅云飞.2023.准全球 6—8 月雨粒子谱和降水反射率因子分布特征分析[J].暴雨灾害,42(5):572−584. Yang K, Fu Y F. 2023. Basic characteristics of monitoring global DPR droplet size distribution and precipitation reflectivity factor from June to August [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):572−584 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023.050

俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202−209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):202−209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

郑永光,陶祖钰,俞小鼎.2017.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,43(6):641−652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting [J]. Meteorological Monthly,43(6):641−652 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.06.001

Cao Q, Hong Y, Gourley J J, et al. 2013. Statistical and physical analysis of the vertical structure of precipitation in the mountainous west region of the United States using 11+ years of spaceborne observations from TRMM precipitation radar [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology,52(2):408−424. doi:10.1175/JAMC.D.12.095.1

Hence D A, Houze R A. 2016. Vertical structure of hurricane eyewalls as seen by the TRMM precipitation radar [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,68(8):1637−1652. doi:10.1175/2011JAS3578.1

Houze J R A, Wilton D C, Smull B F. 2007. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM precipitation radar [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,133(627):1389−1411. doi:10.1002/qj.106

Kim K, Park J, Baik J, et al. 2016. Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM 3B42 over Far East Asia [J]. Atmospheric Research,187(5):95−105. doi:10.1016/j.atmosres.2016.12.007

Le M, Chandrasekar V. 2013a. Hydrometeor profile characterization method for dual. frequency precipitation radar onboard the GPM [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,51(6):3648−3658. doi:10.1109/TGRS.2012.2224352

Le M, Chandrasekar V. 2013b. Precipitation type classification method for dual. frequency precipitation radar (DPR) onboard the GPM [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,51(3):1784−1790. doi:10.1109/TGRS.2012.2205698

Prakash S, Mitra A K, Aghakouchak A, et al. 2016. A preliminary assessment of GPM. based multi. satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region [J]. Journal of Hydrology,2016:865−876. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.029

Sharifi E, Steinacker R, Saghafian B. 2017. Hourly comparison of GPM IMERG Final Run and IMERG Real Time (V. 03) over a dense surface network in Northeastern Austria [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts

Yuter S E, Houze J R A. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity [J]. Monthly Weather Review,123(7):1921−1940. doi:10.1175/1520.0493(1995)1232.0.CO;2

Zhang A, Chen Y, Zhang Q, et al. 2020. Structure of cyclonic precipitation in the northern Pacific storm track measured by GPM DPR [J]. Journal of Hydrometeorology,21(2):227−240. doi:10.1175/JHM.D.19.0161.1

(责任编辑 唐永兰)