

吴若婷,杨思晓,黄楚贤,等,2026.“海葵”残涡的雨滴谱特征及其对 S/X 波段定量降水估测算法的影响[J].气象,52(1):29-43. Wu R T, Yang S X, Huang C X, et al, 2026. Characteristics of raindrop size distribution of the residual vortex of Typhoon Haikui and its impact on the S/X-band QPE algorithms[J]. Meteor Mon, 52(1):29-43(in Chinese).

“海葵”残涡的雨滴谱特征及其对 S/X 波段定量降水估测算法的影响^{*}

吴若婷^{1,3,4} 杨思晓^{2,3,4} 黄楚贤^{2,3,4} 甘 泉¹ 王 刚⁵

1 广东省惠州市气象局,惠州 516000

2 广东省惠州市气象安全科技创新中心,惠州 516000

3 广东省惠州市云物理与强降水重点实验室,惠州 516000

4 粤港澳大湾区气象研究院,广州 510630

5 广州气象卫星地面站,广州 510630

提 要: 利用多台 DSG5 天气现象仪分析了 2023 年第 11 号台风“海葵”残涡在珠三角的雨滴谱特征,并评估基于观测雨滴谱的定量降水估测(QPE)算法在 S/X 波段的性能。结果表明,“海葵”残涡对珠三角的降雨影响主要分为两个阶段:第一阶段主要受残涡本体东侧西南季风和偏东气流汇合影响,水汽辐合层深厚,降雨微物理过程较为均匀,雨滴粒径相对较小、数浓度较高;第二阶段主要是残涡外围的边界层偏南风辐合导致的强降雨,水汽辐合层浅薄,降雨粒子较为分散,具有较多粒径大而数浓度低的降雨。总体上,中雨滴对过程总降雨量起主要贡献,但是随着雨强增加,第二阶段极大雨滴对雨强的贡献明显高于第一阶段。基于本次过程的雨滴谱反演的双偏振参量表明,相同雨强(R)下,第一阶段的水平反射率因子(Z_H)、差分传播相移率(K_{DP})和差分反射率因子(Z_{DR})比第二阶段要小。基于雨滴谱数据计算 S/X 波段不同 QPE 算法的偏差,发现: $R(Z_H)$ 在 S 波段和 X 波段的偏差都较大; $R(Z_H, Z_{DR})$ 在 S 波段的偏差较小,但在 X 波段的偏差随着雨强增大明显增大; $R(K_{DP})$ 在 X 波段具有更好的性能; $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 则在 S/X 波段都表现最好,并且受雨滴谱变化影响最小,在两个阶段差别不大。

关键词: 海葵,台风残涡,雨滴谱分布,双偏振参量,雷达定量降水估测

中图分类号: P412, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2025. 051901

Characteristics of Raindrop Size Distribution of the Residual Vortex of Typhoon Haikui and Its Impact on the S/X-band QPE Algorithms

WU Ruoting^{1,3,4} YANG Sixiao^{2,3,4} HUANG Chuxian^{2,3,4} GAN Quan¹ WANG Gang⁵

1 Huizhou Meteorological Office of Guangdong Province, Huizhou 516000

2 Huizhou Innovation Center for Meteorological Safety of Guangdong Province, Huizhou 516000

3 Huizhou Key Laboratory of Cloud Physics and Heavy Rainfall of Guangdong Province, Huizhou 516000

4 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Academy of Meteorological Research, Guangzhou 510630

5 Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510630

Abstract: Multiple DSG5 raindrop disdrometers are utilized to analyze the raindrop size distribution of the residual vortex of Typhoon Haikui in 2023 in the Pearl River Delta, and the performance of radar quantitative precipitation estimation (QPE) algorithms based on observed raindrop size distribution in the S/X-bands is

* 广东省气象局科研项目(GRMC2023Q02)、惠州市科技计划项目(2021SC010303001)、惠州市气象局科技项目(2022Q01)和广州气象卫星地面站研究项目(2302)共同资助

2024 年 12 月 19 日收稿; 2025 年 5 月 19 日收修定稿

第一作者:吴若婷,主要从事云物理及季风降水等相关领域研究. E-mail:846585476@qq.com

通讯作者:甘泉,主要从事大气探测研究. E-mail:102405135@qq.com

evaluated. The results indicate that the impact of the residual vortex of Haikui on rainfall in the Pearl River Delta can be divided into two main stages. The first stage is primarily influenced by the convergence of the southwest monsoon and easterly airflow on the eastern side of the vortex itself, with a deep moisture convergence layer. The microphysical processes of rainfall are relatively uniform with higher number concentrations and relatively small particle sizes of raindrops. The second stage is characterized by severe rainfall caused by the convergence of southerly winds in the boundary layer on the outskirts of the residual vortex, with a shallower moisture convergence layer. The rainfall particles are more dispersed, with more rainfall events featuring large diameters and low number concentration of raindrops. Overall, medium-sized raindrops make a major contribution to the total rainfall amount, but as rainfall intensity increases, the contribution of extremely large raindrops to rainfall intensity at the second stage is significantly higher than that at the first stage. The dual-polarization parameters derived from raindrop size distribution of this process shows that, under the same rainfall intensity (R), horizontal reflectivity factor (Z_H), specific differential phase (K_{DP}), and differential reflectivity (Z_{DR}) at the first stage are smaller than those at the second stage. The deviation of QPE algorithms in the S/X-bands calculated based on disdrometers data shows that, $R(Z_H)$ has relatively large biases in both the S-band and X-band, while the bias of $R(Z_H, Z_{DR})$ is relatively small in the S-band but increases significantly with increasing rainfall intensity in the X-band while $R(K_{DP})$ has better performance in the X-band. $R(K_{DP}, Z_{DR})$ performs the best in both the S/X-band and is minimally affected by changes in raindrop size distribution, with little difference between the two stages.

Key words: Typhoon Haikui, typhoon residual vortex, raindrop size distribution, dual-polarization parameter, radar quantitative precipitation estimation

引 言

台风残涡是导致暴雨灾害的重要影响系统之一。在其他系统的相互配合下,残涡环流可以长时间维持,导致持续强降水过程。2013 年超强台风“尤特”残留低涡与季风急流相互联结,造成广西特大暴雨(陈见等,2014);2022 年台风“暹芭”残涡在陆上长时间维持,导致湖南、河南、安徽和山东等地大范围降水(柳龙生和许映龙,2024);2023 年台风“杜苏芮”减弱后的残涡北上,造成华北地区极端暴雨事件(杨晓亮等,2023;张江涛等,2023)。目前的研究主要关注残涡长时间维持或复苏的成因:活跃的低空急流与残涡长时间联结,源源不断向残涡补充水汽和不稳定能量,有利于残涡长时间维持(李英等,2005;陈见等,2014);冷空气侵入环流(任丽等,2018)、残涡北上与中高纬系统的相互作用(杨舒楠等,2023)也是残涡维持的重要原因。

除了对残涡系统产生的降雨影响及其环流形势等宏观分析,对残涡系统的降雨微物理性质研究也具有重要意义。雨滴谱分布(DSD)是指单位体积内雨滴数量随雨滴粒径的变化情况,是研究降雨微物

理结构的重要内容之一。研究表明,受天气系统、季节变化、大气条件和地理环境等因素的影响,雨滴谱分布存在显著的差异(Chakravarty and Raj, 2013; Wen et al, 2016; 王俊等, 2022; 胡雅君等, 2022)。Tokay et al(2008)的研究表明热带气旋降水具有高浓度的中、小雨滴,而温带气旋则存在较高浓度的大雨滴。赵城城等(2021)指出北京山区的雨滴粒径(数浓度)与平原地区相比偏大(低),与经典对流滴谱相比,山区(平原)更倾向于大陆性(海洋性)对流滴谱。冯璐等(2019;2020)通过对飑线系统的雨滴谱分析发现,飑线系统不同降水部位以及不同类型的飑线系统雨滴谱分布均存在明显差异。目前对于台风残涡系统降雨的雨滴谱特征研究相对较少,相关的研究有利于提高残涡降雨微物理特征的认识。

雨滴的形状、速度、浓度等特征直接影响天气雷达所测得的各类偏振参量,是天气雷达定量降水估测(QPE)的重要基础(Doviak, 1983; 赵城城等, 2014)。因此,对不同类型降雨的滴谱分析,对提高雷达定量降水估测具有重要意义。目前广东的 S 波段天气雷达大部分已完成双偏振升级,多地也已经布设 X 波段相控阵双偏振雷达。与单偏振雷达相比,双偏振雷达除了反射率因子,还可以获得差分反

射率因子(Z_{DR})、差分传播相移率(K_{DP})和相关系数(CC)等双偏振参量,可以更精细地描述粒子的形态,有利于提高强对流天气监测识别以及提升定量降水估测能力。许多研究已经提出了基于双偏振参量的QPE算法以及它们的组合应用(王建林等,2005;Cifelli et al,2011),其中QPE算法的参数由降水雨滴谱决定,因此有必要通过观测雨滴谱建立不同类型降雨的双偏振参量与降雨的关系,以此改进QPE方案(曾广宇等,2021;李锦梁等,2024;李力等,2024)。

2023年第11号台风“海葵”于9月6日17:00(北京时,下同)减弱停编后,其残涡长时间盘踞在广东。受其影响,广东多地出现了暴雨到大暴雨、局地特大暴雨,强降水影响范围广,持续时间长,极端性强,造成严重的灾害。本文将聚焦本次残涡降雨过程,分析残涡降雨的雨滴谱特征的时空差异,以提高对残涡降雨微物理性质的认识。此外,通过观测雨滴谱反演不同波段的雷达双偏振参量,为类似过程的双偏振雷达定量降水估测以及不同波段雷达降水融合提供参考。

1 数据与方法

珠江三角洲(珠三角,下同)位于广东省中南部,濒临南海,中部主要由冲积平原组成,地势相对平缓,西部、东部和北部则是丘陵山地环绕,形成三面环山之势(图1)。本文使用的观测资料为珠三角29个

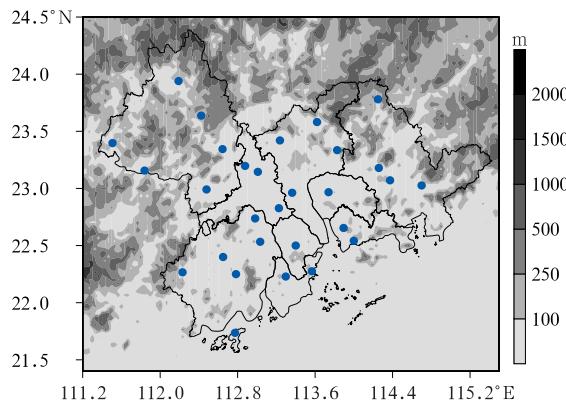


图1 珠三角海拔高度(阴影)及国家级气象观测站(蓝色圆点)分布

Fig. 1 Altitude (shaded) of the Pearl River Delta and distribution of national meteorological stations (blue dot)

国家级气象观测站布设的DSG5天气现象仪和雨量计。雨滴谱观测数据时间分辨率为1 min,共32个直径和32个速度档分级,与Parsivel雨滴谱仪的分级标准相同(付志康等,2022)。雨量计的时间分辨率为1 min,与DSG5对应。使用的再分析资料为欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向共37层。

在对雨滴谱观测数据进行微物理参量计算前,需要对数据进行质量控制。质量控制方案为:(1)由于前两个粒径通道信噪比太低,剔除前两个尺度档;(2)一般而言,自然降水中直径超过8 mm的大雨滴很少观测到,因此剔除雨滴直径大于8 mm的数据;(3)在这个过程中,大部分粒子下落速度在经验速度附近,但略大于经验值(图略),这与付志康等(2022)的研究一致,为减少强风和粒子飞溅的影响,剔除粒子下落速度与经验下落速度(Brandes et al,2002)相差在 $\pm 60\%$ 外的粒子;(4)对于分钟样本数据,如果雨强小于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 或者记录的粒子数小于10个,则将其剔除(Tokay and Bashor,2010);(5)DSG5型天气现象仪的采样截面积为 54 cm^2 ,考虑到边界效应,需根据Jaffrain and Berne(2011)提出的公式 $[180 \times (30 - D/2)]$ 获得不同粒径的有效采样面积(D 为32个粒径区间的平均值)。

按上述方案进行质量控制后,29台天气现象仪共获取63 751 min有效数据,由此得到常用的雨滴谱特征参数(Wen et al,2016)。包括:单位体积、单位粒径区间内雨滴数浓度 $N(D)$ (单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)、雨强 R (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、反射率因子 Z (单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)和液态水含量 W (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。利用雨滴谱的3、4阶矩计算质量加权平均直径 D_m (单位:mm)和标准化截距参数 N_w (单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)。 N_w 是反映雨滴数浓度大小的独立物理量(Testud et al,2001),一般取其对数进行分析,即 $\lg N_w$ 。分析发现,利用雨滴谱数据计算的小时降雨量与雨量计数据的拟合度超过0.97,两者的一致性高,表明数据结果可靠。

T矩阵法是目前国际上应用最为广泛的散射计算方法之一(Waterman,1965;1971)。利用T矩阵可以计算单个粒子的散射截面,进而得到基于后向散射的水平反射率因子(Z_H)、差分反射率因子(Z_{DR})和基于前向散射的差分传播相移率(K_{DP})等雷达偏振参量(Zhang et al,2001;冯亮等,2019;陈

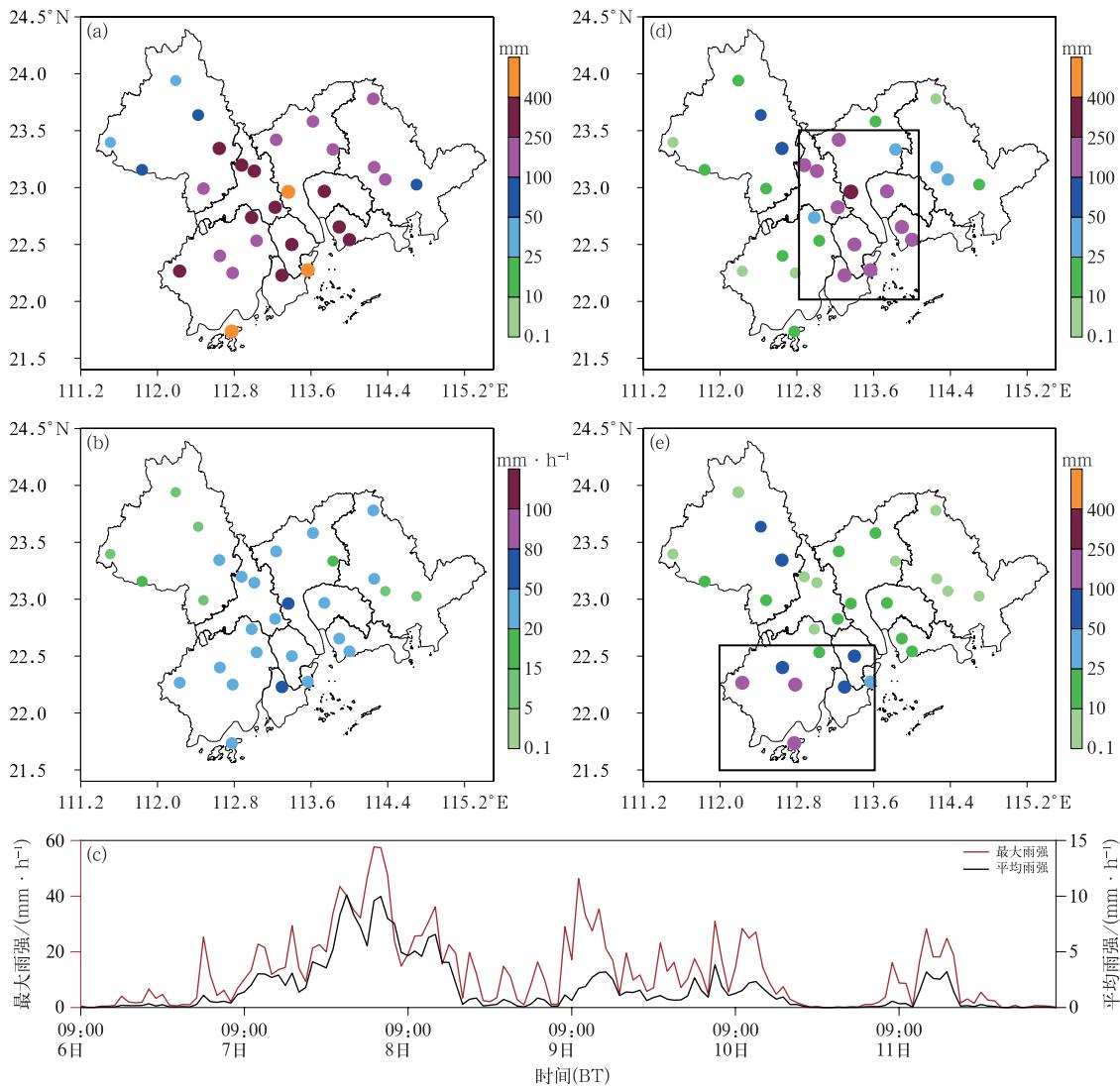
超等,2023)。

2 “海葵”残涡对珠三角的降雨影响及环流形势

2.1 降雨实况及回波特征

受台风“海葵”残涡影响,9月6—11日,广东自

东向西连续6天出现大暴雨,其中珠三角7—11日均有站点录得大暴雨,并且7—8日多地降雨突破本地历史纪录。具体来看,“海葵”残涡影响期间,珠三角地区过程累计降雨量大值区分布在珠江口,呈喇叭状分布,番禺过程最大累计降雨量为525.4 mm(图2a)。最大雨强基本为20~50 mm·h⁻¹,番禺和斗门出现了雨强超过50 mm·h⁻¹的强降雨(图2b)。从区域站来看,珠三角过程最大累计降雨



注:图d,e中黑色方框分别是两个阶段的关键区域。

图2 2023年9月珠三角(a~c)6日08:00至12日08:00(a)累计降雨量和(b)最大雨强的空间分布,(c)平均和最大雨强随时间的变化;(d)第一阶段(7日22:00至8日06:00)、(e)第二阶段(9日09:00—18:00和10日05:00—12:00)累计降雨量的空间分布

Fig. 2 (a, b) Distribution of (a) accumulated rainfall, (b) maximum rainfall intensity, and (c) temporal evolution of average and maximum rainfall intensity from 08:00 BT 6 to 08:00 BT 12, and (d, e) distribution of accumulated rainfall at (d) first stage (22:00 BT 7 to 06:00 BT 8) and (e) second stage (09:00 BT to 18:00 BT 9 and 05:00 BT to 12:00 BT 10) in the Pearl River Delta in September 2023

量出现在深圳东湖(692.1 mm),66.3%的站点最大雨强为 $20\sim50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图略)。为了与雨滴谱仪匹配,本文只分析国家级气象观测站的降雨。

珠三角的平均及最大雨强随时间的变化基本一致(图2c),7日下午降雨开始增强,在7日夜间至8日早晨达到峰值,强降雨区主要分布在珠江口附近(图2d)。8日下午至9日早晨,强降雨区随着残涡向西移动,珠三角进入降雨间歇期。9日白天至10日下午,降雨又趋于明显,但强度较7—8日明显减小,强降雨范围收缩,主要出现在珠三角西部地区(图2e)。11日,强降雨范围进一步收缩。根据降雨落区以及环流形势(见2.2节)的不同,本文将“海葵”残涡影响珠三角的强降雨过程分为两个阶段:第一阶段是9月7—8日,分析时段是7日22:00至8日06:00,第二阶段是9月9—10日,分析时段是9日09:00—18:00及10日05:00—12:00。

S波段天气雷达显示两个阶段的最大雷达反射率因子基本在50~55 dBz(图略)。在两个阶段雨强较强时,番禺(第一阶段)和上川岛(第二阶段)单站的雷达反射率因子垂直剖面均显示,高于30 dBz的回波主要位于6 km左右及以下,不同的是,番禺的最大反射率因子基本接近地面(图3a),而上川岛的最大反射率因子主要在2~5 km(图3b)。

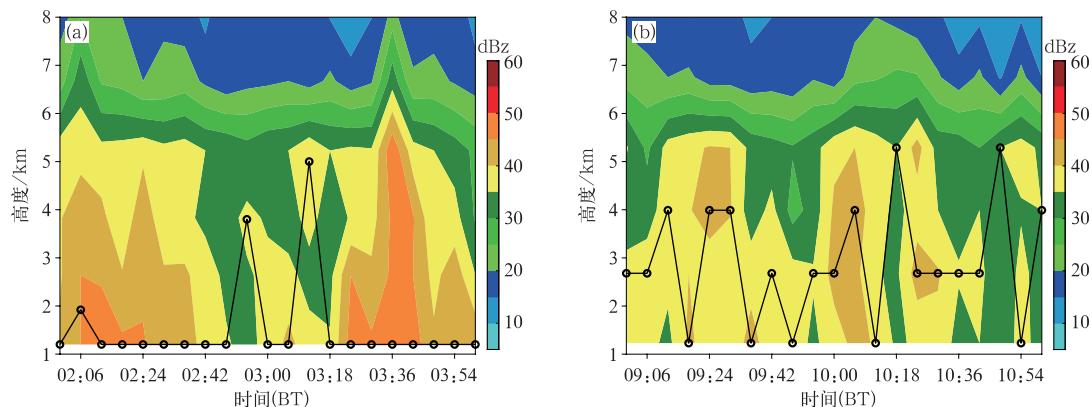


图3 2023年9月“海葵”残涡影响珠三角过程的单站反射率因子垂直分布(填色)及最大反射率因子所在高度(黑色实线)随时间的变化

(a)第一阶段:7日02:00—04:00 番禺站,(b)第二阶段:9日09:00—11:00 上川岛站

Fig. 3 Temporal evolution of the vertical distribution of reflectivity factor (colored) and the height of maximum reflectivity factor (solid black line) at a single station during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

(a) first stage: 02:00 BT to 04:00 BT 7 at Panyu Station,
(b) second stage: 09:00 BT to 11:00 BT 9 at Shangchuandao Station

2.2 环流形势

“海葵”残涡叠加季风影响是导致本次过程强降水的主要原因。在第一阶段,残涡中心位于珠三角西部,在其南侧增强的西南季风及东侧偏东气流不断卷入汇合,输送大量暖湿气流,形成的边界层螺旋强辐合带与珠三角强降雨区基本一致(图4a,4b),说明边界层辐合是引发强降雨的主要抬升动力条件(林确略等,2023)。7日夜间至8日,珠江口附近水汽通量辐合层从低层伸展到600 hPa,对应着强的上升运动(图5a)。同时高层辐散提供抽吸作用,中层弱引导气流导致残涡移动缓慢(陈训来等,2024;陈涛等,2025),共同导致7日夜间至8日早晨珠江口附近城市的持续强降雨。8日下午至9日早晨,残涡西移,西南季风减弱,强降雨区主要位于粤西地区(图略)。

9日上午起,随着低层西南季风增强,珠三角降雨又趋于明显,进入第二阶段。在此阶段残涡中心进一步西移,结构较第一阶段松散,残涡本体降雨主要位于粤西,但是在残涡外围,受西南季风北推影响,珠三角西部的边界层水汽通量仍能达到 $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,存在明显的水汽通量辐合。但水汽通量以及水汽通量散度强度都较第一阶段弱(图4c,4e),且在850 hPa主要表现为弱的辐合甚至

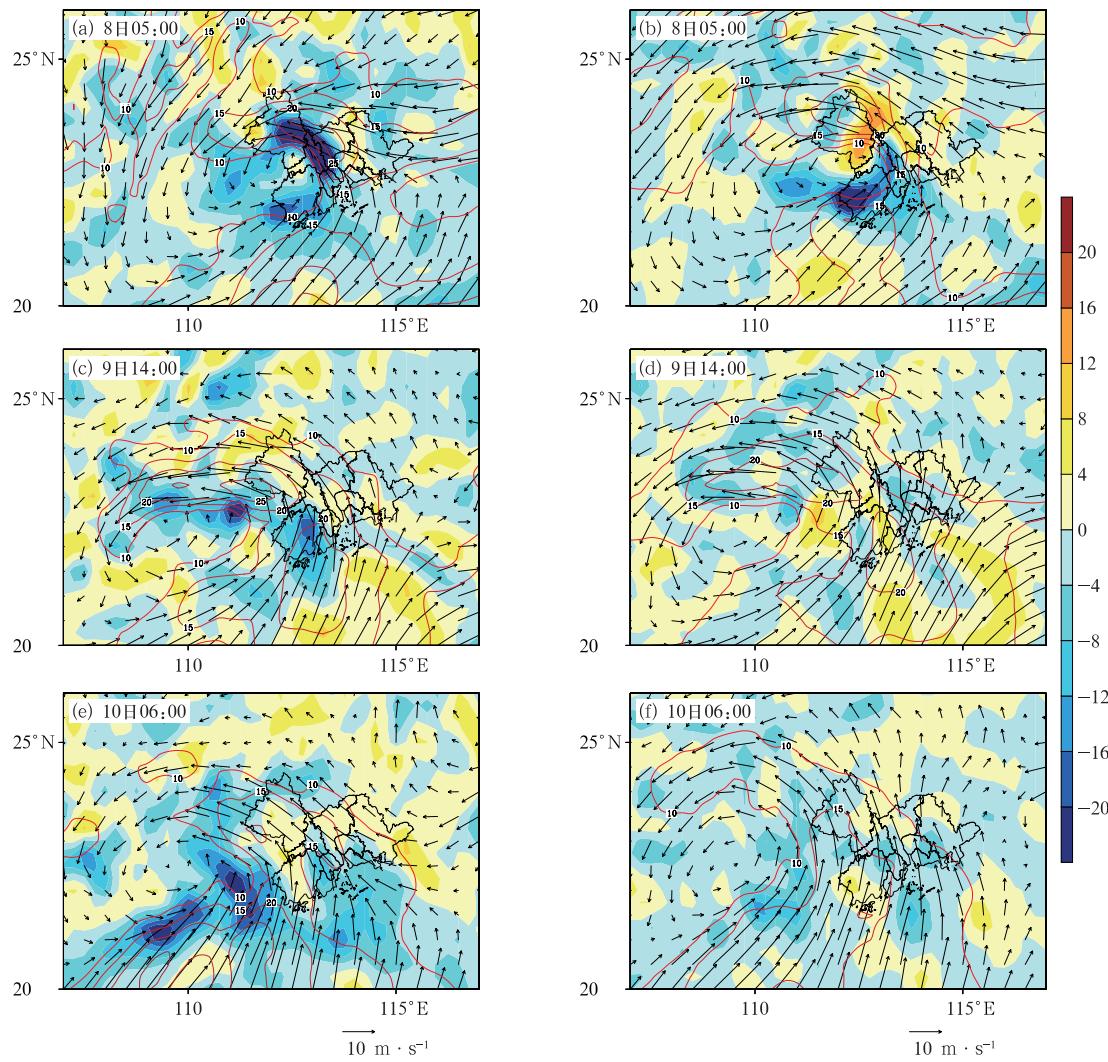


图 4 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程(a,b)第一阶段,(c~f)第二阶段风场(风矢)、水汽通量(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a,c,e)925 hPa,(b,d,f)850 hPa

Fig. 4 The wind field (wind vector), water vapor flux (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a, b) first stage and (c-f) second stage during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023
(a, c, e) 925 hPa, (b, d, f) 850 hPa

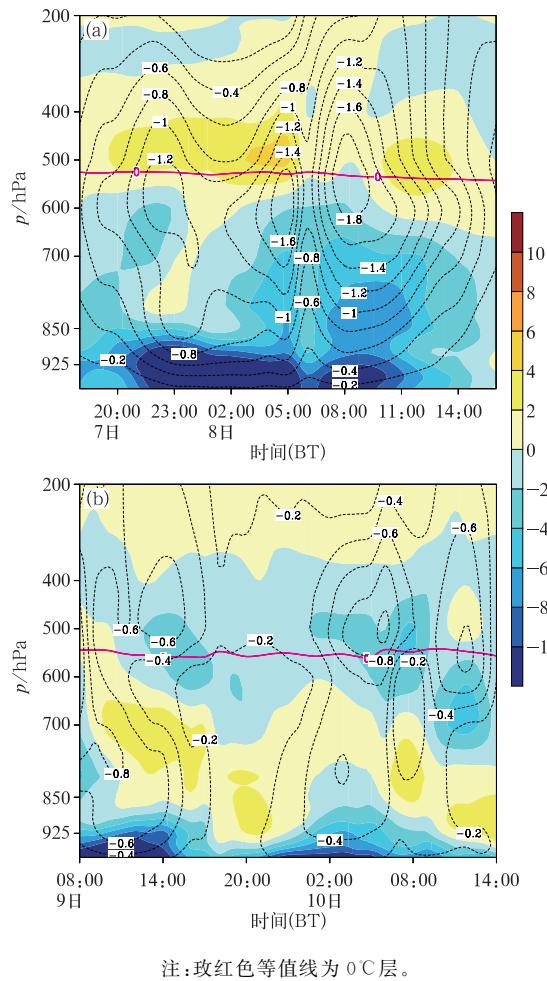
是辐散(图 4d, 4f)。水汽辐合主要集中在边界层附近,与降雨时段对应较好,但辐合层不如第一阶段深厚,垂直速度比第一阶段弱(图 5b),且中层引导气流较第一阶段强(图略),降水系统移动较快,因此累计降雨量和范围都比第一阶段小。

3 降雨微物理特征分析

3.1 平均雨滴谱特征

本次残涡降雨过程中平均雨滴谱主要呈现单峰

结构,站点峰值粒径约为 $0.625 \sim 0.750 \text{ mm}$,小部分为 $0.375 \sim 0.625 \text{ mm}$ (图 6a)。各个站点的雨滴数浓度量级在 $0.625 \sim 1.50 \text{ mm}$ 区间差异较小,而在其两侧的小雨滴端及较大雨滴端差异较大。按照 Bringi et al(2003)提出的分类方法,区分了本次过程中的对流云(6729 min)和层状云(18 288 min)降水。对流云降水比例超过 0.3 的站点与过程累计降雨量大值区分布基本一致,比例最高为番禺 0.51(图 6d)。相比层状云降水,对流云降水具有更宽的粒径谱及更高的雨滴数浓度(图 6b, 6c),且不同站点的对流云降水平均雨滴谱存在明显差异。珠三角



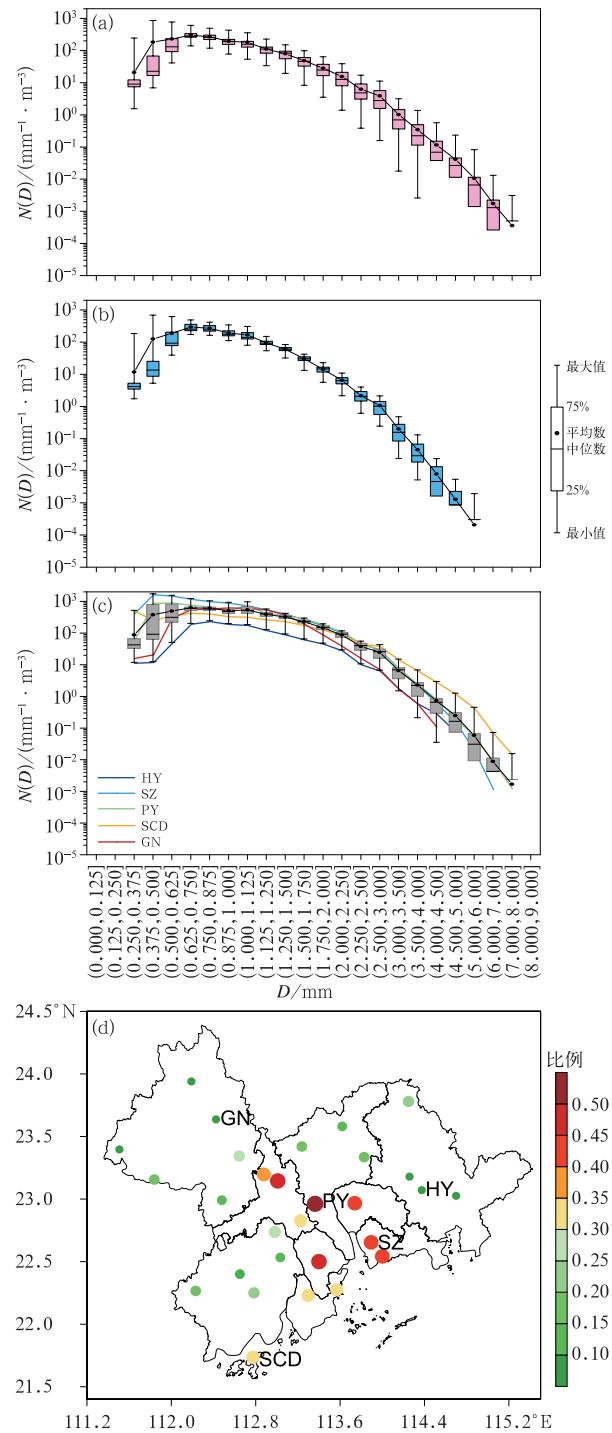
注：玫瑰色等值线为0℃层。

图5 2023年9月“海葵”残涡影响珠三角过程

(a)第一阶段,(b)第二阶段关键区域的
垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和
水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
垂直分布随时间的变化

Fig. 5 Temporal evolution of the vertical distribution of vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) in the key area at (a) first stage and (b) second stage during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

东部(惠阳)及北部(广宁)的雨滴数浓度基本在平均值以下,因为这两个地区对流降水强度总体较弱。珠江口附近的番禺和深圳的小雨滴数浓度明显高于平均值,而中等以上雨滴数浓度与平均值接近。上川岛的特点是大雨滴数浓度高于平均值,但是中小雨滴数浓度低于平均值,这种差异可能是因为上川岛在第二阶段降雨较明显,而番禺和深圳降雨主要在第一阶段,这也意味着两个阶段的降雨微物理性质可能存在差异。

注：图c,d中字母指代站名：HY：惠阳，GN：广宁，
PY：番禺，SZ：深圳，SCD：上川岛。图6 2023年9月7日08:00至11日08:00(a~c)不同类型降水平均雨滴谱的箱线分布及其(d)对流云降水
出现频次占总样本(对流云+层状云降水)的比例分布

(a)全部样本,(b)层状云,(c)对流云

Fig. 6 (a-c) Boxplots of average raindrop spectra of different rainfall types and (d) distribution of the proportion of convective cloud rainfall frequency to the total samples (convective cloud + stratiform cloud) from 08:00 BT 7 to 08:00 BT 11 September 2023
(a) all samples, (b) stratiform cloud, (c) convective cloud

3.2 不同尺度雨滴粒径对降雨的贡献

为了分析不同尺度的雨滴粒径(D)对降雨量的贡献,将粒径分为不同尺度区间,并分析不同尺度粒径对雨强及总降雨量的贡献。张庆池等(2022)的研究将雨滴分为小雨滴($D < 1.0 \text{ mm}$)、中雨滴($1.0 \text{ mm} \leq D \leq 2.5 \text{ mm}$)和大雨滴($D > 2.5 \text{ mm}$)。由图 6a 可见,当 $D > 4 \text{ mm}$ 时雨滴数浓度明显降低,并且不是所有站点都存在 $D > 4 \text{ mm}$ 的雨滴,因此,本文将大雨滴进一步区分为大雨滴($2.5 \text{ mm} < D \leq 4.0 \text{ mm}$)和极大雨滴($D > 4.0 \text{ mm}$)。图 7a 显示小雨滴对总降雨量的贡献比例较大的区域主要位于珠三角北部,与其降雨量较小相对应。中雨滴对本次残涡降雨过程的贡献比例($0.48 \sim 0.75$)最大,其中西部沿海地区相对较小,在 0.60 以下(图 7b)。大雨滴对总降雨量贡献比例超过 0.15 的区域主要位于珠江口附近及珠三角西部(图 7c),与两个阶段的强降雨区域重合。极大雨滴对总降雨量贡献很小(图 7d)。

图 8 进一步给出不同尺度雨滴粒径对不同雨强

的贡献比例。当雨强较小时,中、小雨滴对雨强起主要贡献,随着雨强增大,小雨滴对雨强的贡献明显减小,大雨滴和极大雨滴对雨强的贡献逐渐增加(图 8a)。中雨滴在雨强小于 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时起主要作用,平均贡献比例超过 0.5,最大接近 0.8。由于在此次残涡降雨过程,雨强超过 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的时次仅占总样本量的 0.8%,因此中雨滴对总降雨量起主要贡献(图 7b)。两个阶段的差异主要体现在中雨滴和极大雨滴对雨强的贡献。第一阶段,极大雨滴对雨强的贡献增长较缓,最大平均贡献比例约为 0.25,而第二阶段可达 0.37(图 8b,8c)。但是,第二阶段强降雨出现的时次较少,所以珠三角西部极大雨滴对总降雨量的贡献少于珠江口附近(图 7d)。由于极大雨滴贡献比例较高,第二阶段的中雨滴对强降雨的相对贡献比例下降。

3.3 D_m - $\lg N_w$ 分布特征及与雨强的关系

为了更直观地分析雨滴微物理特征,本文对两个阶段关键区(图 2 黑色方框)的 D_m - $\lg N_w$ 进行分

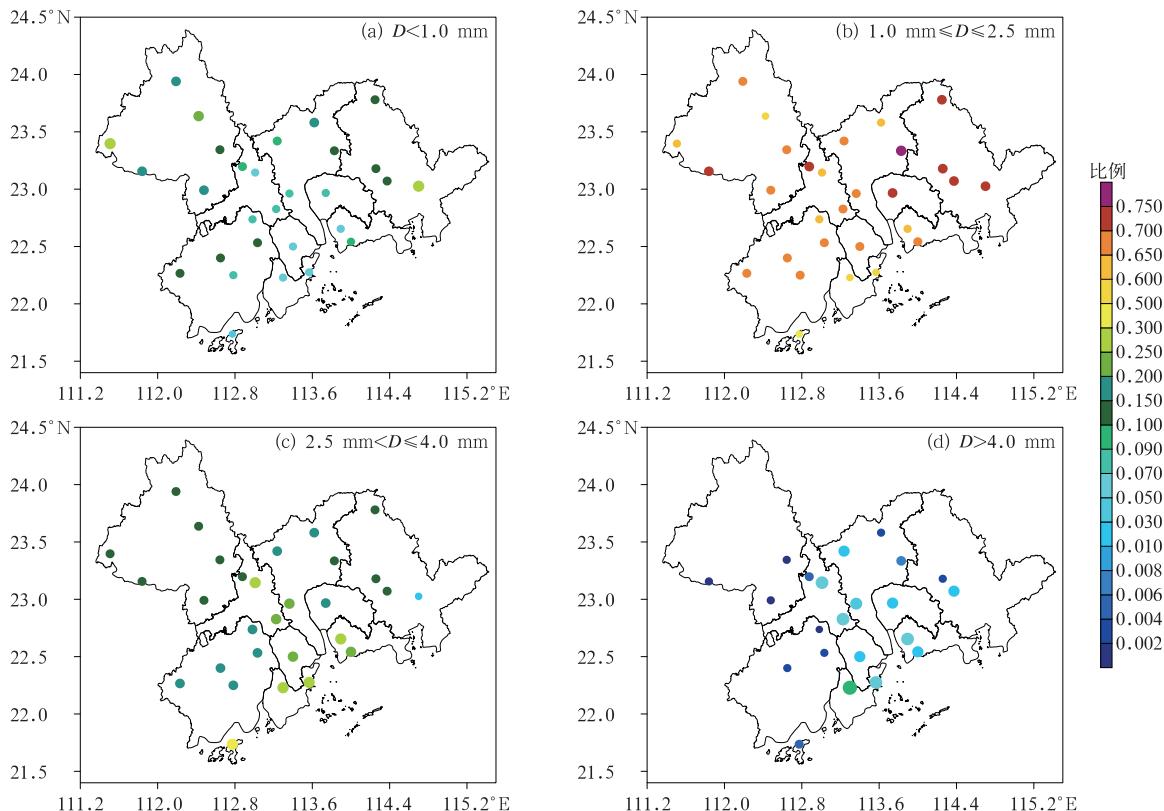


图 7 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程不同尺度雨滴粒径(D)对总降雨量贡献比例的空间分布

Fig. 7 Distribution of the fractional contribution of different raindrop particle sizes to total rainfall amount during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

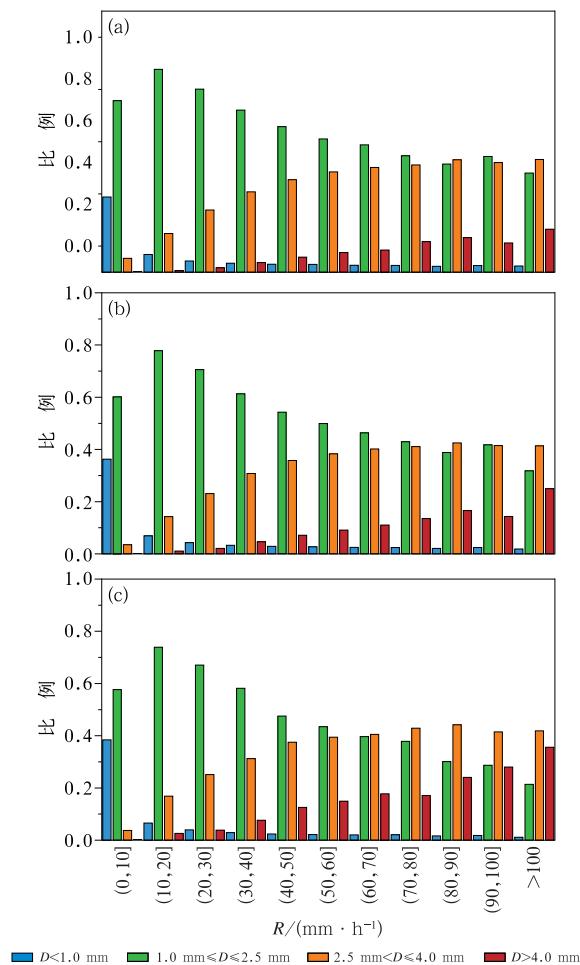


图 8 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程不同尺度雨滴粒径(D)对雨强(R)的贡献比例

(a) 所有样本, (b) 第一阶段, (c) 第二阶段

Fig. 8 Fractional contribution of different raindrop particle sizes to rainfall intensity during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023
(a) all samples, (b) first stage, (c) second stage

析。结果显示,第一阶段的 D_m - $\lg N_w$ 分布较为集中,既存在海洋性对流降水,也存在大陆性对流降水,但总体呈现 D_m 较小、 $\lg N_w$ 较高的特征,即雨滴粒径相对较小,数浓度较大(图 9a)。第二阶段的 D_m - $\lg N_w$ 分布较为分散, $\lg N_w$ 总体小于第一阶段,即具有更多雨滴粒径大、数浓度低的降雨(图 9b)。从降水回波来看,两个阶段的对流都更倾向海洋性降水,但是第二阶段最大反射率因子所在高度较高(图 3),这可能与两个阶段雨滴谱分布不同有关。

研究表明,随着雨强增大,雨滴碰并和破碎过程会逐渐达到平衡(Hu and Srivastava, 1995; Chen

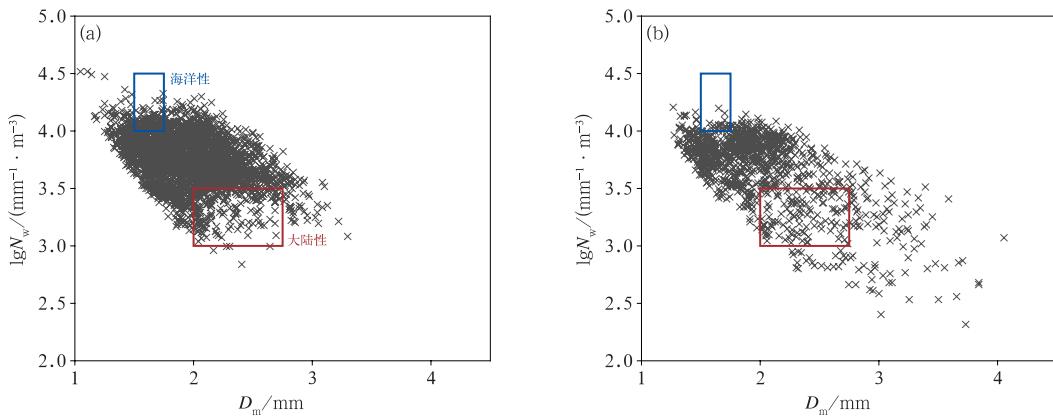
et al, 2013),表现在雨滴谱上就是 D_m 和 $\lg N_w$ 趋于稳定。图 10 显示第一阶段的 D_m - R 和 $\lg N_w$ - R 分布都比第二阶段更加集中, D_m ($\lg N_w$) 在 2.5 mm ($4.0 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$) 左右趋于稳定。由于第一阶段降雨微物理性质比较均匀,因此可以推测珠三角多地破纪录的极端暴雨主要是由这种高 $\lg N_w$ 和较大 D_m 的降雨长时间维持导致的。第二阶段,相同雨强下, D_m ($\lg N_w$) 明显高(低)于第一阶段。两个阶段微物理性质差异的原因可能是:第一阶段湿层深厚,有利于抑制雨滴蒸发(Tokay and Short, 1996),因此雨滴的数浓度更高,此外第一阶段虽然具有更强上升运动,但较大上升运动主要在 0°C 层以下(图 5a),可能暖雨过程更加明显;而第二阶段较大上升运动主要位于 0°C 层以上(图 5b),液相水凝物可能被抬升到 0°C 以上,过冷云水含量增加,冰相粒子与过冷水共存可能通过 Bergeron 过程使粒径迅速增长(Richard et al, 1987; 付炜等, 2022)。

4 基于雨滴谱的双偏振参量及 S/X 波段 QPE 算法评估

由于广东主要使用 S 波段和 X 波段双偏振雷达,因此本节将分析基于雨滴谱反演的 S/X 波段雷达双偏振参量及不同 QPE 算法在两个阶段的差异。

Z - R 关系是雷达定量降水估测的基础。基于雨滴谱数据得到两个阶段不同雷达参量与雨强的关系,结果显示,随着雨强增大,第一阶段的 Z_H 逐渐小于第二阶段(图 11a, 11d),即相同的 Z_H 下,第一阶段具有更高的雨强,降雨效率更高。相同雨强下, X 波段的 Z_H 高于 S 波段。 $R(Z_H)$ 受雨滴谱变化影响较大,与实况雨强的一致性最低,均方根误差(RMSE)最大,S 波段的拟合度高于 X 波段(表 1)。 K_{DP} 与降雨一致性非常高,相同 K_{DP} 下,第一阶段具有更高的雨强。 $R(K_{DP})$ 与实况雨强的拟合度较 $R(Z_H)$ 有所提高, RMSE 减小。S 波段的 K_{DP} 明显小于 X 波段(图 11b, 11e)。S 波段和 X 波段雷达双偏振参量的差异,与大粒子的米散射在 X 波段更加明显有关(刘于新等, 2024)。

作为参考,将本次过程与 2021 年郑州“7·20”极端暴雨(全天、峰值时段)及经典关系式的 $R(Z_H)$ 和 $R(K_{DP})$ 进行对比(张哲等, 2022; Fulton et al, 1998; Cifelli et al, 2011)。第一阶段的 $R(Z_H)$ 和 $R(K_{DP})$ 与“7·20”全天及经典的关系式相近,但相



注:蓝色和红色矩形框分别为 Bringi et al(2003)提出的海洋性和大陆性对流降水范围。

图 9 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程(a)第一阶段、

(b)第二阶段关键区域对流云降水的 D_m - $\lg N_w$ 散点分布

Fig. 9 Scatter plots of D_m - $\lg N_w$ for convective cloud precipitation in the key area at (a) first stage and (b) second stage during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

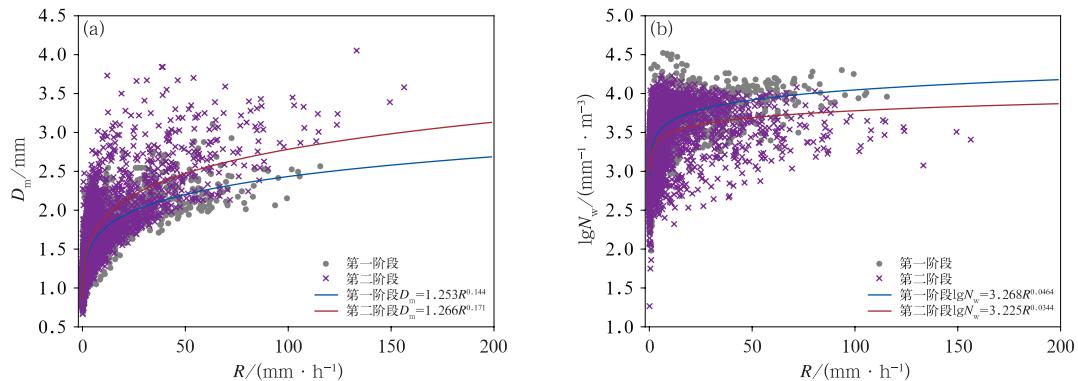


图 10 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程第一阶段和第二阶段对流云降水的
(a) D_m - R 和 (b) $\lg N_w$ - R 散点分布及拟合曲线

Fig. 10 Scatter plots and fitting curves of (a) D_m - R and (b) $\lg N_w$ - R for convective cloud precipitation at first stage and second stage during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

同 Z_H 或 K_{DP} 下, 雨强小于“7·20”峰值时段(图 11d, 11e)。第二阶段的 $R(Z_H)$ 和 $R(K_{DP})$ 拟合曲线均位于其他曲线上侧, 表明使用其他几种关系式会高估第二阶段降雨量。由此可见, 雨滴谱特征的差异对雷达定量降水估测的精度有明显的影响。

Z_{DR} 代表水凝物粒子平均水平-垂直轴之间的形状差异, 一般来说雨滴越小, 形状越趋于球状, Z_{DR} 接近 0 dB。相同雨强下, 第一阶段的 Z_{DR} 总体较小(图 11c, 11f), 与第一阶段 D_m 相对较小是一致的。 Z_{DR} 通常与 Z_H 或者 K_{DP} 一起进行降雨估测, 表 1 显示, $R(Z_H, Z_{DR})$ 和 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 与实况雨强的拟合度

比单一的 $R(Z_H)$ 和 $R(K_{DP})$ 又有所提升, RMSE 进一步减小。

为评估本次过程不同 QPE 算法在 S/X 波段的偏差, 将雨滴谱计算的雷达参量输入表 1 中四种 QPE 算法后得到的降雨率与真值进行对比(图 12), 除了第二阶段在雨强较大时由于样本较少出现了 RMSE 的波动, 四种算法的 RMSE 总体上随着雨强增大趋于增大, 这也解释了表 1 中第一阶段 RMSE 高于第二阶段(第一阶段强降雨样本较多)。 $R(Z_H)$ 反演的雨强偏差明显偏大, X 波段的偏差高于 S 波段(图 12a)。在 $R(Z_H, Z_{DR})$ 中, 随着雨强的增加,

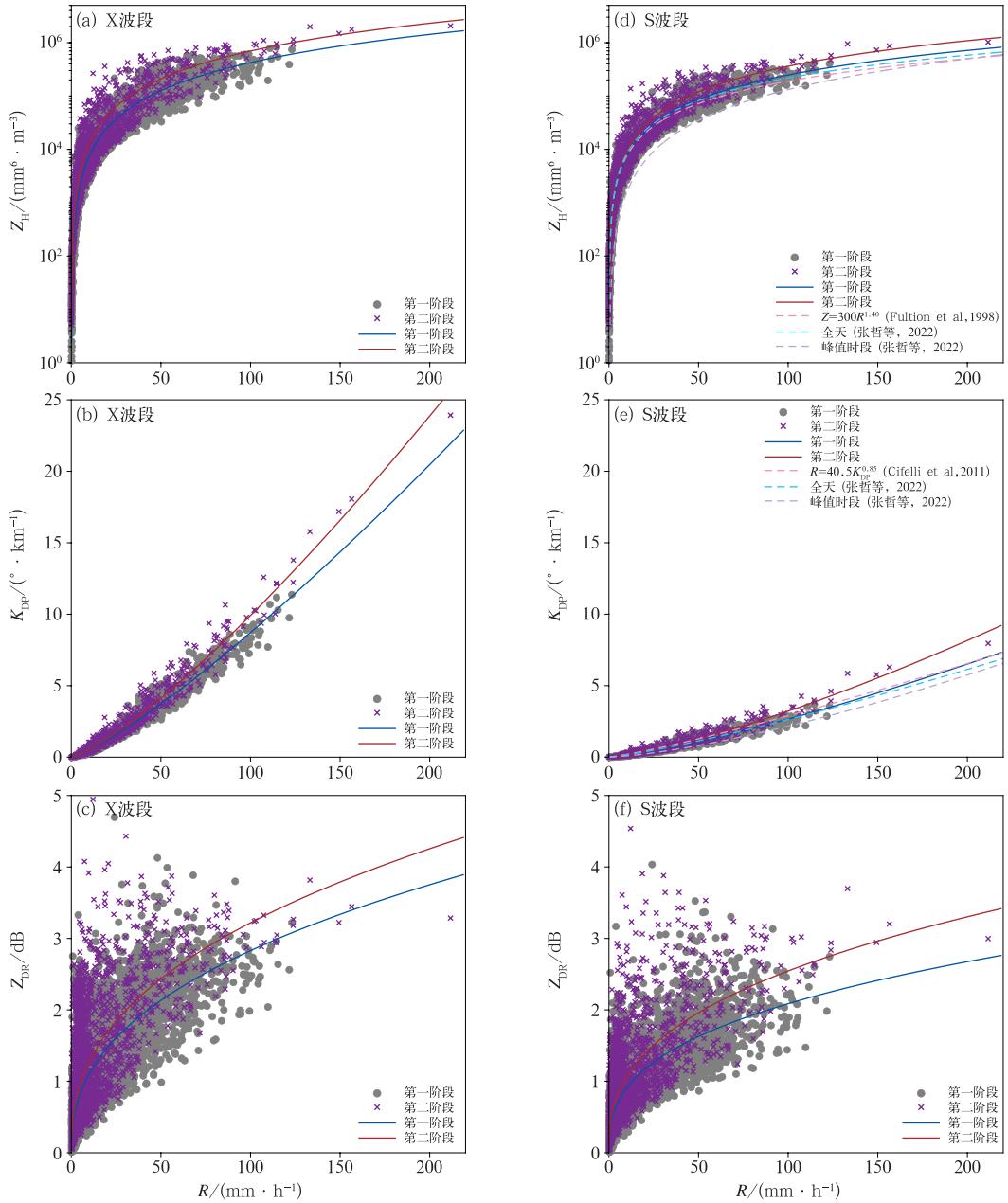


图 11 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程基于雨滴谱仪的 S/X 波段雷达双偏振参量与雨强的散点图和拟合曲线

(a, d) $Z_H - R$, (b, e) $K_{DP} - R$, (c, f) $Z_{DR} - R$

Fig. 11 Scatter plots and fitting curves of S/X-band radar dual polarization parameters and rainfall intensity based on disdrometers during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

(a, d) $Z_H - R$, (b, e) $K_{DP} - R$, (c, f) $Z_{DR} - R$

S 波段的 RMSE 缓慢增长,而 X 波段的偏差随着雨强增大明显增加(图 12b)。对于 $R(K_{DP})$,相同雨强下,S 波段的偏差比 X 波段大(图 12c),因此在不考虑雷达数据质量等问题的理想条件下,本次过程使用 X 波段雷达 $R(K_{DP})$ 的效果应该优于 S 波段。

Z_{DR} 和 K_{DP} 能提供降雨粒子更详细的信息,因此两者的结合对雨强反演偏差最小,并且在 X 波段和 S 波段的差异较小(图 12d)。

四种 QPE 算法中,第一阶段的 RMSE 总体小于第二阶段,这可能与第一阶段的降雨微物理性质

表 1 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程基于雨滴谱仪的 S/X 波段不同 QPE 算法
及其与雨强的拟合度和 RMSE(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Table 1 Different QPE algorithms in the S/X-bands based on disdrometers as well as their fitting degrees and RMSE with rainfall intensity (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui affecting the Pearl River Delta in September 2023

波段	第一阶段				第二阶段			
	QPE 算法	拟合度	RMSE	QPE 算法	拟合度	RMSE		
X 波段	$R(Z_H) = 0.157 \times Z_H^{0.4869}$	0.75	8.00	$R(Z_H) = 0.1132 \times Z_H^{0.4939}$	0.66	5.66		
	$R(K_{DP}) = 17.63 \times K_{DP}^{0.7874}$	0.84	6.99	$R(K_{DP}) = 16.54 \times K_{DP}^{0.7721}$	0.80	4.69		
	$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0134 \times Z_H^{0.8679} \times 10^{(-0.377Z_{DR})}$	0.84	6.89	$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0119 \times Z_H^{0.8946} \times 10^{(-0.429Z_{DR})}$	0.82	4.42		
	$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 22.64 \times K_{DP}^{0.8931} \times 10^{(-0.0761Z_{DR})}$	0.85	6.72	$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 25.3 \times K_{DP}^{0.9186} \times 10^{(-0.1078Z_{DR})}$	0.85	4.17		
S 波段	$R(Z_H) = 0.0591 \times Z_H^{0.590}$	0.79	7.64	$R(Z_H) = 0.0558 \times Z_H^{0.577}$	0.71	5.39		
	$R(K_{DP}) = 46.36 \times K_{DP}^{0.7424}$	0.83	7.13	$R(K_{DP}) = 41.23 \times K_{DP}^{0.7245}$	0.78	4.88		
	$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0086 \times Z_H^{0.857} \times 10^{(-0.271Z_{DR})}$	0.85	6.71	$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0069 \times Z_H^{0.882} \times 10^{(-0.285Z_{DR})}$	0.84	4.31		
	$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 75.82 \times K_{DP}^{0.8808} \times 10^{(-0.1255Z_{DR})}$	0.85	6.71	$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 79.79 \times K_{DP}^{0.902} \times 10^{(-0.1405Z_{DR})}$	0.85	4.19		

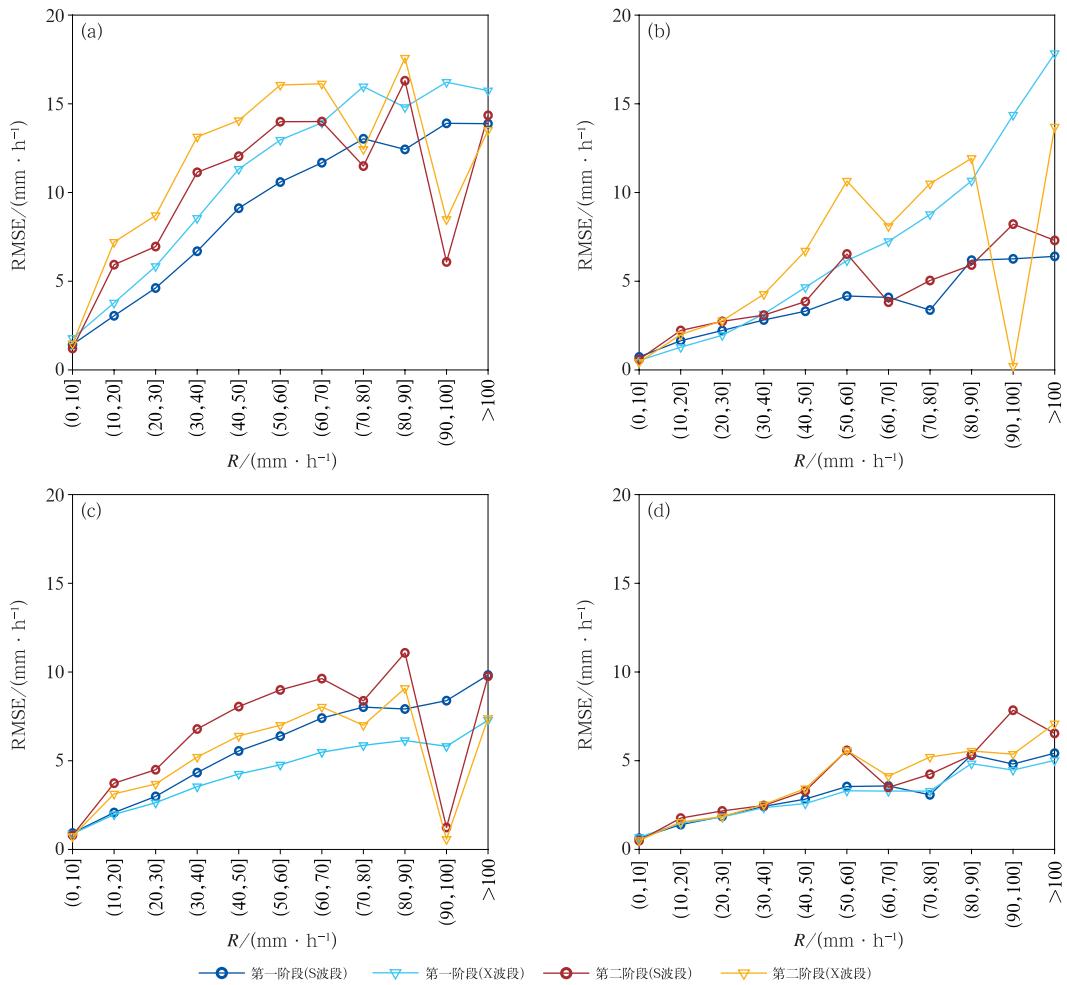


图 12 2023 年 9 月“海葵”残涡影响珠三角过程基于雨滴谱仪的 S/X 波段不同 QPE 算法的 RMSE 随雨强的变化
(a) $R(Z_H)$, (b) $R(Z_H, Z_{DR})$, (c) $R(K_{DP})$, (d) $R(K_{DP}, Z_{DR})$

Fig. 12 Variation of RMSE of different QPE algorithms in the S/X-bands with rainfall intensity
based on disdrometers during the process of the residual vortex of Typhoon Haikui
affecting the Pearl River Delta in September 2023

(a) $R(Z_H)$, (b) $R(Z_H, Z_{DR})$, (c) $R(K_{DP})$, (d) $R(K_{DP}, Z_{DR})$

更加均匀有关。其中 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 在两个阶段的 RMSE 都比较小,说明两者结合能减少雨滴谱变化对 QPE 的影响,与 Ryzhkow and Zrnic(1994)的研究结果一致。四种算法在 S/X 波段的偏差评估,能为 S 波段和 X 波段雷达的降水融合提供一定的参考。但本文仅分析雨滴谱变化对单一 QPE 算法的影响,实际应用中经常是根据 Z_H 、 K_{DP} 和 Z_{DR} 在不同阈值的表现使用组合算法,同时还需考虑雷达观测误差、衰减等问题(张哲等,2021;施红等,2023)。

5 结论与讨论

基于珠三角国家气象观测站雨量计、DSG5 天气现象仪及再分析资料,本文分析了 2023 年 9 月 7—10 日“海葵”残涡及季风环流对珠三角的降雨影响、环流形势及雨滴谱特征,并评估了基于本次过程的雨滴谱信息的双偏振 QPE 算法在 S/X 波段的性能,主要的结论如下:

(1)“海葵”残涡对珠三角降雨的影响可以分为两个阶段。第一阶段主要是残涡本体东侧西南季风和偏东气流源源不断卷入,辐合层深厚,降水持续时间长,影响范围广;而第二阶段主要由残涡外围的边界层偏南风辐合导致,水汽辐合层浅薄,累计降雨量及影响范围不如第一阶段。

(2)本次残涡降雨过程中平均雨滴谱主要呈现单峰结构,不同站点层云降水雨滴谱分布较为一致,但对流云降水雨滴谱差异较大。第一阶段的雨滴谱分布更加集中,总体呈现 D_m 较小、 $\lg N_w$ 较高的特征,即雨滴粒径较小、数浓度较高。第二阶段的滴谱较为分散,相同雨强下, D_m ($\lg N_w$) 高(低)于第一阶段,具有较多高 D_m 、低 $\lg N_w$ 的降雨。总的来看,中雨滴对总降雨量起主要贡献,但在不同阶段、不同尺度雨滴粒径对雨强的贡献存在差异。在第二阶段中,随着雨强增加,极大雨滴对雨强的贡献明显高于第一阶段。

(3)基于本次过程的观测雨滴谱计算 S/X 波段的雷达双偏振参量,结果表明,相同雨强下,第一阶段的 Z_H 、 K_{DP} 和 Z_{DR} 更小。基于雨滴谱拟合的第一阶段的 $R(Z_H)$ 和 $R(K_{DP})$ 与郑州“7·20”全天和经典的 $R(Z_H)$ 和 $R(K_{DP})$ 关系比较接近,但是会高估第二阶段的降雨,说明不同雨滴谱信息对 QPE 精度影响比较大。对比 S/X 波段 QPE 算法的偏差, $R(Z_H)$ 在 S 波段和 X 波段偏差都较大; $R(Z_H, Z_{DR})$

在 S 波段的偏差较小,但在 X 波段的偏差则随着雨强增大明显增大;而 $R(K_{DP})$ 在 X 波段具有更好的性能; $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 则在 S/X 波段都表现最好,并且受雨滴谱变化影响最小,在两个阶段差别不大。

本文初步揭示了“海葵”残涡降雨在两个阶段的微物理性质差异及其对 S/X 波段 QPE 算法的影响,但仍有许多科学问题值得进一步深入研究。一是对于两个阶段微物理性质差异的原因还需要更深入的探讨,需要结合相关的云微物理分析以及中小尺度数值模拟进行进一步分析;二是需要收集更多的残涡降雨个例以得到更加系统客观的残涡降雨微物理特征,以提升对此类过程进行数值模拟以及雷达定量降水估测的能力。

参考文献

- 陈超,刘黎平,罗聪,等,2023. 两种雨滴谱仪观测对比及对雷达降水估测精度影响研究[J]. 气象,49(10):1157-1170. Chen C, Liu L P, Luo C, et al, 2023. Comparison of two kinds of disdrometers and their influence on the accuracy of radar quantitative precipitation estimation[J]. Meteor Mon, 49 (10): 1157-1170 (in Chinese).
- 陈见,赖珍权,罗小莉,等,2014.“尤特”超强台风残留低涡引发的广西特大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害,33(1):19-25. Chen J, Lai Z Q, Luo X L, et al, 2014. Cause analysis of a torrential rain event induced by residual vortex from super severe Typhoon Utor in Guangxi[J]. Torr Rain Dis, 33(1):19-25 (in Chinese).
- 陈涛,李嘉睿,许先煌,等,2025.“海葵”台风残涡极端暴雨的对流组织特征及成因[J]. 大气科学学报,48(1):77-92. Chen T, Li J R, Xu X H, et al, 2025. Structure and organization of convection during extreme precipitation associated with the remnant vortex of Typhoon Haikui[J]. Trans Atmos Sci, 48(1):77-92 (in Chinese).
- 陈训来,徐婷,王蕊,等,2024. 珠江三角洲“9·7”极端暴雨精细观测特征及成因[J]. 应用气象学报,35(1):1-16. Chen X L, Xu T, Wang R, et al, 2024. Fine observation characteristics and causes of “9·7” extreme heavy rainstorm over Pearl River Delta, China[J]. J Appl Meteor Sci, 35(1):1-16 (in Chinese).
- 冯亮,肖辉,罗丽,2019. T 矩阵散射模拟双偏振测雨雷达偏振及衰减特性[J]. 计算物理,36(2):189-202. Feng L, Xiao H, Luo L, 2019. Simulation of polarization characteristics and attenuation of dual-polarization rain-measuring radar with T-Matrix methods [J]. Chin J Comput Phys, 36(2):189-202 (in Chinese).
- 冯璐,陆海琦,李丰,等,2020. 广东地区一次飑线过程的地面雨滴谱特征分析[J]. 热带气象学报,36(5):626-637. Feng L, Lu H Q, Li F, et al, 2020. Characteristics of the raindrop size distribution in a squall line measured by two-dimensional video disdrometer in Guangdong[J]. J Trop Meteor, 36(5):626-637 (in Chinese).
- 冯璐,夏丰,万齐林,等,2019. 广东两次飑线过程的微物理特征分析

- 研究[J]. 热带气象学报, 35(6): 812-821. Feng L, Xia F, Wan Q L, et al, 2019. Characteristics of the raindrop size distribution in two squall lines measured by two-dimensional video disdrometer at Guangdong[J]. J Trop Meteor, 35(6): 812-821(in Chinese).
- 付炜, 唐明晖, 叶成志, 等, 2022. 强西南急流背景下南岭山脉一次暖区大暴雨数值模拟分析[J]. 热带气象学报, 38(2): 203-215. Fu W, Tang M H, Ye C Z, et al, 2022. Numerical simulation of warm-sector heavy rainfall process over Nanling Mountains under strong low-level southwest jet[J]. J Trop Meteor, 38(2): 203-215(in Chinese).
- 付志康, 万蓉, 肖艳姣, 等, 2022. 业务 DSG5 型降水现象仪与 Parsivel 降水滴谱仪测量参数对比分析[J]. 暴雨灾害, 41(4): 434-444. Fu Z K, Wan R, Xiao Y J, et al, 2022. Comparison of precipitation measurement by DSG5 and Parsivel present weather instrument[J]. Torr Rain Dis, 41(4): 434-444(in Chinese).
- 胡雅君, 张伟, 张玉轩, 等, 2022. 闽南沿海 2018—2019 年季风爆发前后雨滴谱特征对比分析[J]. 气象学报, 80(4): 618-631. Hu Y J, Zhang W, Zhang Y X, et al, 2022. Comparative analysis of raindrop size distribution characteristics before and after monsoon onset in southern coast of Fujian Province in 2018—2019[J]. Acta Meteor Sin, 80(4): 618-631(in Chinese).
- 李锦梁, 郑佳锋, 薛力夫, 等, 2024. 福建沿海平原和山地地区的雨滴谱差异研究[J]. 气象学报, 82(5): 694-708. Li J L, Zheng J F, Xue L F, et al, 2024. On the difference of raindrop spectra between coastal plain and mountain areas in Fujian Province, Southeast China[J]. Acta Meteor Sin, 82(5): 694-708(in Chinese).
- 李力, 徐芬, 刘希, 等, 2024. 雨滴谱数据在 S 波段双偏振天气雷达数据质量评估中的应用[J]. 气象, 50(2): 210-220. Li L, Xu F, Liu X, et al, 2024. Application of raindrop disdrometer data in data quality evaluation of S-band dual-polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 50(2): 210-220(in Chinese).
- 李英, 陈联寿, 徐祥德, 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学, 29(1): 91-98. Li Y, Chen L S, Xu X D, 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation[J]. Chin J Atmos Sci, 29(1): 91-98(in Chinese).
- 林确略, 杨延志, 黄小燕, 等, 2023. 台风“海葵”残涡长久维持及引发广西极端强降水成因分析[J]. 气象研究与应用, 44(4): 14-22. Lin Q L, Yang Y Z, Huang X Y, et al, 2023. Analysis of the causes of an extreme rainfall event in Guangxi induced by the long-lasting maintenance of the residual vortex of Typhoon HaiKui [J]. J Meteor Res Appl, 44(4): 14-22(in Chinese).
- 柳龙生, 许映龙, 2024. 台风“暹芭”(2203)残涡陆上维持并引发大范围降水过程的成因[J]. 高原气象, 43(3): 683-695. Liu L S, Xu Y L, 2024. Analysis of the prolonged maintenance and the accompanying widespread precipitation of Typhoon Chaba (2203) remnant after landfall[J]. Plateau Meteor, 43(3): 683-695 (in Chinese).
- 刘于新, 马建立, 陈明轩, 等, 2024. S 波段与 X 波段天气雷达探测参数差异及组网融合处理研究[J]. 气象, 50(4): 488-498. Liu Y X, Ma J L, Chen M X, et al, 2024. Study on differences and fusion mosaic methods of parameters between S-band and X-band weather radars[J]. Meteor Mon, 50(4): 488-498(in Chinese).
- 任丽, 赵玲, 马国忠, 等, 2018. 台风残涡北上引发东北地区北部暴雨的尺度特征分析[J]. 高原气象, 37(6): 1671-1683. Ren L, Zhao L, Ma G Z, et al, 2018. Analysis of mesoscale feature of a heavy rainstorm caused by typhoon residual vortex in the northern part of Northeast China[J]. Plateau Meteor, 37(6): 1671-1683(in Chinese).
- 施红, 顾松强, 黄兴友, 等, 2023. 上海浦东 X 波段双线偏振雷达衰减订正效果分析[J]. 气象, 49(4): 487-494. Shi H, Gu S Q, Huang X Y, et al, 2023. Analysis of attenuation correction to an X-band dual-polarization Doppler weather radar at Pudong, Shanghai [J]. Meteor Mon, 49(4): 487-494(in Chinese).
- 王建林, 刘黎平, 曹俊武, 2005. 双线偏振多普勒雷达估算降水方法的比较研究[J]. 气象, 31(8): 25-30, 41. Wang J L, Liu L P, Cao J W, 2005. A comparison of methods of rainfall rate measurements by dual linear polarization doppler radar [J]. Meteor Mon, 31(8): 25-30, 41(in Chinese).
- 王俊, 丛春华, 王洪, 等, 2022. 台风温比亚(2018)登陆后雨滴谱演变特征研究[J]. 气象, 48(11): 1449-1459. Wang J, Cong C H, Wang H, et al, 2022. Evolution characteristics of raindrop size distribution of landfalling Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 48(11): 1449-1459(in Chinese).
- 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. 暴雨灾害, 42(5): 508-520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al, 2023. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. Torr Rain Dis, 42(5): 508-520(in Chinese).
- 杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等, 2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. 气象, 49(12): 1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 49(12): 1451-1467(in Chinese).
- 曾广宇, 郭泽勇, 周钦强, 等, 2021. 基于激光雨滴谱的双偏振雷达定量降水估测算法应用评估[J]. 气象研究与应用, 42(4): 95-100. Zeng G Y, Guo Z Y, Zhou Q Q, et al, 2021. Application evaluation of dual polarization radar quantitative precipitation estimation algorithm based on laser raindrop spectrum[J]. J Meteor Res Appl, 42(4): 95-100(in Chinese).
- 张江涛, 何丽华, 李江波, 等, 2023. 河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 大气科学学报, 46(6): 884-903. Zhang J T, He L H, Li J B, et al, 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23·7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Trans Atmos Sci, 46(6): 884-903(in Chinese).
- 张庆池, 刘端阳, 武艳, 等, 2022. 淮北地区不同类型暴雨雨滴谱特征及其 Z-R 关系研究[J]. 气象学报, 80(6): 967-985. Zhang Q C, Liu D Y, Wu Y, et al, 2022. Raindrop spectral characteristics and Z-R relationship of different rainstorm types in Huabei Region [J]. Acta Meteor Sin, 80(6): 967-985(in Chinese).

- 张哲,戚友存,李东欢,等,2022.2021年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J].*大气科学*,46(4):1002-1016. Zhang Z, Qi Y C, Li D H, et al, 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(4):1002-1016 (in Chinese).
- 张哲,戚友存,朱自伟,等,2021.深圳S波段与X波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用[J].*气象学报*,79(5):786-803. Zhang Z, Qi Y C, Zhu Z W, et al, 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(5):786-803 (in Chinese).
- 赵城城,杨洪平,刘晓阳,等,2014.大雨滴对雷达定量测量降水的影响研究[J].*暴雨灾害*,33(2):106-111. Zhao C C, Yang H P, Liu X Y, et al, 2014. Effects of large raindrops on radar quantitative precipitation estimation[J]. *Torr Rain Dis*, 33(2): 106-111 (in Chinese).
- 赵城城,张乐坚,梁海河,等,2021.北京山区和平原地区夏季雨滴谱特征分析[J].*气象*,47(7):830-842. Zhao C C, Zhang L J, Liang H H, et al, 2021. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution between mountain and plain areas over Beijing in summer[J]. *Meteor Mon*, 47(7):830-842 (in Chinese).
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 41(6):674-685.
- Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al, 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis[J]. *J Atmos Sci*, 60(2):354-365.
- Chakravarty K, Raj P E, 2013. Raindrop size distributions and their association with characteristics of clouds and precipitation during monsoon and post-monsoon periods over a tropical Indian station[J]. *Atmos Res*, 124:182-189.
- Chen B J, Yang J, Pu J P, 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China [J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 91(2):215-227.
- Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al, 2011. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: application in Colorado precipitation events[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 28(3):352-364.
- Doviak R J, 1983. A survey of radar rain measurement techniques [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 22(5):832-849.
- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al, 1998. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. *Wea Forecasting*, 13(2):377-395.
- Hu Z, Srivastava R C, 1995. Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: theory and observations [J]. *J Atmos Sci*, 52(10):1761-1783.
- Jaffrain J, Berne A, 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARISVEL disdrometers[J]. *J Hydrometeorol*, 12(3):352-370.
- Richard E, Chaumerliac N, Mahfouf J F, et al, 1987. Numerical simulation of orographic enhancement of rain with a mesoscale model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 26(6):661-669.
- Ryzhkov A V, Zrnic D S, 1994. Precipitation observed in Oklahoma mesoscale convective systems with a polarimetric radar[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 33(4):455-464.
- Testud J, Oury S, Black R A, et al, 2001. The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: a tool for cloud physics and cloud remote sensing[J]. *J Appl Meteorol Climatol*, 40(6):1118-1140.
- Tokay A, Bashor P G, 2010. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(11):2348-2365.
- Tokay A, Bashor P G, Habib E, et al, 2008. Raindrop size distribution measurements in tropical cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 136(5): 1669-1685.
- Tokay A, Short D A, 1996. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 35(3):355-371.
- Waterman P C, 1965. Matrix formulation of electromagnetic scattering[J]. *Proc IEEE*, 53(8):805-812.
- Waterman P C, 1971. Symmetry, unitarity, and geometry in electromagnetic scattering[J]. *Phys Rev*, 3(4):825-839.
- Wen L, Zhao K, Zhang G F, et al, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(5): 2265-2282.
- Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E, 2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 39(4):830-841.

(本文责编:戴洋)