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

“海葵”台风残涡引发广州极端降水多尺度特征及成因

魏蕾 张兰 梁之彦

Multi-scale characteristics and causes of extreme precipitation induced by Typhoon "Haikui" residual vortex in Guangzhou

WEI Lei，ZHANG Lan，LIANG Zhiyan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-133

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

湖北“8·12”极端降水特征及成因初探
Analysis of characteristics and causes of "8.12" extreme precipitation in Hubei Province
暴雨灾害. 2023, 42(1): 13-23 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-109

东北移高原低涡引发我国西北两次强降水过程的对比分析
Comparative analysis of two heavy precipitation events in Northwest China induced by northeastward Tibetan Plateau vortices
暴雨灾害. 2023, 42(2): 144-149 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-014

ECMWF集合预报在一次台风远距离极端降水分析中的应用
Application of ECMWF ensemble prediction system on an extreme heavy rainfall cause by a remote tropical cyclone
暴雨灾害. 2021, 40(6): 626-636 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.007

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析
Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin
暴雨灾害. 2023, 42(1): 24-36 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024

沙颍河流域一次短时极端强降水预报失误剖析
Analysis of forecast error for a short-term extreme precipitation event in the Shaying River Basin
暴雨灾害. 2021, 40(5): 494-504 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.006

湖北省夏季引发极端降水的MCS统计特征分析
Statistical characteristics of extreme precipitation induced by MCS in Hubei Province
暴雨灾害. 2021, 40(2): 147-152 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

魏蕾,张兰,梁之彦.2026.“海葵”台风残涡引发广州极端降水多尺度特征及成因[J].暴雨灾害,45(2):218−228. WEI Lei, ZHANG Lan, LIANG Zhiyan. 2026. Multi-scale characteristics and causes of extreme precipitation induced by Typhoon "Haikui" residual vortex in Guangzhou [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):218−228 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−133

“海葵”台风残涡引发广州极端降水多尺度特征及成因

魏蕾, 张兰, 梁之彦
(广东省广州市气象局, 广州 511430)

摘　要: 2023 年 9 月 7—8 日, 受台风“海葵”残涡影响, 广州出现了近 10 a 第三强暴雨过程, 表现为过程累积雨量大、降水范围广、降水极端性强、持续时间长、夜雨明显的特点。利用地面常规气象站观测、热带气旋最佳路径、雷达和再分析等多源资料, 分析了形成本次极端降水过程的大尺度环流背景及物理量异常特征, 探讨了造成夜雨明显的中尺度特征及成因。结果表明: (1) 本次过程广州 20 mm·h^{-1} 和 50 mm·h^{-1} 以上的短时强降水持续时间分别长达 13 h 和 9 h, 最大小时雨量达到 80 mm 以上。较高的降水效率和较长的强降水持续时间是造成极端降水产生的重要原因。(2) 弱引导气流导致“海葵”残涡移动缓慢, 强盛的西南季风和偏东急流交汇并稳定维持、同时提供充沛的水汽, 配合 200 hPa 南亚高压辐散抽吸作用, 是此次极端降水过程有利的大尺度环流背景。(3) 极端降水的发生与大尺度环流场的异常及其造成的物理量异常密切相关。200 hPa 辐散、925 hPa 辐合和 925 hPa 水汽通量辐合在广州均具有显著的极端异常性, 偏离气候平均态四倍标准差以上, 假相当位温在广州存在中等强度的正异常中心, 异常极端的动力抬升、水汽和热力条件共同导致了降水极端性的出现。(4) 广州低层急流的加强、中尺度能量锋区的触发、暖平流输送和边界层水汽辐合的显著增强是夜雨明显的重要诱因。对流单体后向传播形成列车效应, 层积混合云降水长时间持续, 低质心暖云降水特征显著, 是引发极端降水的直接原因; 高浓度中小雨滴是主要的云微物理特征。

关键词: 台风残涡; 极端降水; 大尺度环流; 标准化异常; 中尺度对流系统
中图法分类号: P458.1^{+}21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−133

Multi-scale characteristics and causes of extreme precipitation induced by Typhoon "Haikui" residual vortex in Guangzhou

WEI Lei, ZHANG Lan, LIANG Zhiyan

(*Guangzhou Meteorological office of Guangdong Province*, *Guangzhou* 511430)

Abstract: Subject to the impact of Typhoon "Haikui" residual vortex, Guangzhou suffered the third strongest rainstorm in nearly 10 years from 7 to 8 September 2023, which has the characteristics of large total amount, wide coverage range, extreme rainfall intensity, long duration and obvious nocturnal precipitation. Based on multi-source data, the precipitation conditions, large-scale circulation causes of extreme precipitation and mesoscale characteristics of nocturnal precipitation are analyzed. The results are as follows. (1) During this process, short-term heavy precipitation with intensity over 20 mm·h^{-1} and 50 mm·h^{-1} in Guangzhou lasted for 13 h and 9 h respectively, and the maximum hourly rainfall reached over 80 mm. The high precipitation efficiency and prolonged duration of intense precipitation lead to the occurrence of extreme precipitation. (2) The retention of "Haikui" residual vortex, the convergence and maintenance of strong monsoon and southeast jet which provided abundant water vapor, and the divergence caused by South Asia High, which constitutes the favorable large-scale circulation background for the extreme precipitation. (3) The occurrence of extreme precipitation is closely related to the anomaly of large-scale circulation and physical parameters. 200 hPa divergence, 925 hPa convergence and 925 hPa water vapor flux convergence all have significant extremes, generally deviating from the standard deviation of climatic state by four times. There exists a moderate-intensity positive anomaly center of pseudo-equivalent potential temperature in Guangzhou. The abnormal extreme dynamic, water vapor and thermal conditions lead to the occurrence of extreme precipitation. (4) The strengthening of southeast jet, the triggering of the mesoscale energy front, the enhancement of water vapor convergence and warm advection are important incentives for the night rain. It

收稿日期: 2024−07−09; **定稿日期**: 2025−03−17
资助项目: 广州市科技计划项目 (2025B01W003); 中国气象局城市气象重点开放实验室开放基金项目 (LUM-2023-07)
第一作者: 魏蕾, 主要从事短期天气预报及其技术方法研究。E-mail: 447247631@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

is generated by the backward propagation of convective cells formed train effect and long duration of mixed cloud precipitation, with significant low echo centroids and warm cloud precipitation characteristics. The high concentration of medium and small raindrops is the main cloud microphysical feature.

Key words: typhoon residual vortex; extreme precipitation; large-scale circulation; standardized anomaly; mesoscale convective system

引　言

我国历史上有记录以来六次最严重的降水事件均与台风有关 (Chen et al., 2010; 陈涛等, 2025), 而广东是我国受台风影响和台风登陆最多的省份 (林良勋, 2009)。台风登陆后, 由于能量耗散, 同时受到地面摩擦, 普遍趋于减弱消亡, 但近年来的研究发现, 即使登陆台风衰减为热带低压或停止编号后, 因台风残涡而产生的高强度降水事件仍较频繁 (姚丽娜等, 2013, 2017; 陆秋霖等, 2024)。

以往研究指出, 台风暴雨主要受不同天气尺度系统相互作用、台风内部结构变化及下垫面强迫等三个方面的影响 (Bao et al., 2015; 陈联寿和许映龙, 2017)。超过一半的台风暴雨发生在台风移动方向的前半部, 其中大多数源于同中纬度系统的相互作用, 而发生在后半部的暴雨则往往与低空西南急流的影响有关 (卢珊等, 2012; 何立富等, 2020)。登陆台风若与西南季风相互作用, 将获得大量水汽和潜热能量, 有利于台风的维持增强和台风雨带中对流活动的加强, 导致降水增强 (Su et al., 2015); 同时西南季风的出现还会产生动力效应, 使得台风切变线附近的辐合增强, 有利于上升运动发展, 增强低层水汽向高层输送, 促使降水加强 (董美莹等, 2009; 姚日升等, 2018)。除了西南水汽通道外, 东南水汽通道也经常成为登陆台风强度维持的主要水汽通道 (王楠喻等, 2021; 杨舒楠等, 2021)。

近年来, 学者们对台风残涡导致的暴雨发生机制也开展了大量研究。残涡可能与中低纬度系统相互作用而发生变性, 或与环境场中的中小尺度对流系统相互作用, 这些条件均能使减弱的台风残涡获得能量而再度引发暴雨; 而残涡暴雨的强度和分布则受到许多大尺度天气系统和环境因素的影响, 包括西太平洋副热带高压 (以下简称为副高)、西风槽、低空急流 (水汽输送)、垂直风切变、高空辐散场和高层流出气流、地形作用等 (周懿等, 2020; 龚俊强等, 2023; 杨舒楠等, 2023)。陈见等 (2014) 研究指出, 1311 号台风“尤特”残涡与季风涌相遇获得潜热能, 是造成残涡复苏并引发广西特大暴雨的重要原因。陈训来等 (2024) 和陈涛等 (2025) 的研究均表明, 在弱环境场引导气流下可造成台风残涡移动缓慢并长时间滞留, 有利于雨量累积和降水增强; 而在有利的天气尺度背景下, 台风残涡中的 β-γ 中尺度涡旋伴随的强烈旋转和辐合有助于形成强的中小尺度上升运动, 形成极端降水。此外, 台风残涡极端降水与环境物理量极端性的关系也开始受到关注, 异常的环流形势和背景条件是极端降水产生的重要信号 (杨舒楠等, 2021; 宋雯雯等, 2024; 杨晓亮等, 2024)。

2023 年第 11 号台风 (2311) “海葵”及其残涡给广东带来了一次持续时间长、累积雨量大、影响范围广的极端降水过程, 也是广东历史上 9 月份最强的降水过程。广州作为本次过程主要的强降水中心, 出现了全市性水浸、树木倒伏、中小河流域洪水超警戒、河堤坍塌等灾情, 对交通、农业、供电等造成严重影响, 各家模式对此次降水强度和范围严重低估, 对于强降水落区预报差异较大, 模式可参考性差, 是一次典型的极端降水漏报过程。本文将利用地面常规气象站观测、热带气旋最佳路径、雷达和再分析等多源资料, 从造成极端降水的大尺度环流背景及物理量异常特征, 以及夜雨明显的中尺度特征及成因等方面分析台风“海葵”残涡引起的极端降水, 以期深入认识台风残涡降水的极端性, 为提高台风残涡极端降水过程的预报服务能力提供参考。

1　资料与方法

1.1　资料说明

使用的资料包括: (1) 2023 年 9 月 3—11 日广东省国家气象观测站和区域气象观测站 (以下分别简称为国家站和区域站) 数据, 包含 1 h 和 24 h 降水量, 用于分析降水实况特征; (2) 2023 年 9 月 3—11 日中国气象局上海台风研究所提供的热带气旋最佳路径数据集, 该数据集包含热带气旋中心位置、中心最低气压及中心附近最大风速等; (3) 2023 年 9 月 7—8 日广东 S 波段多普勒天气雷达反演资料和番禺 X 波段双偏振相控阵天气雷达资料, 时间分辨率分别为 6 min 和 1 min, 主要选用产品包括反射率因子 (Z_H)、差分反射率 (Z_{DR}) 和差分传播相移率 (K_{DP}), 用来分析中尺度对流及精细化观测特征; (4) 欧洲中期天气预报中心提供的 1993—2022 年 (共计 30 a, 时间分辨率为 1 a) 和 2023 年 9 月 6—8 日的再分析资料 (时间分辨率为 1 h), 水平分辨率为 0.25°×0.25°, 垂直方向上从 1 000 hPa 到 1 hPa 共 37 层, 包含位势高度、散度、温度、比湿、风场、垂直速度、海平面气

压、整层大气可降水量等数据，用于分析环流形势及其物理量的异常特征。

1.2 研究方法

对于极端降水，可通过对环流形势和要素场偏离气候平均态的程度进行判断，一般偏离 3 倍以上标准差意味着小概率极端事件发生的可能性较大(孙军等, 2012)。为分析环流形势和物理量场的异常特征，定义标准化异常 (D_s) 为变量场偏离气候态的程度，计算公式如下

$$D_s = (F - M)/\sigma$$

式中，F 为某一时刻某一气象场或物理量的值，M 为该变量场同时刻 30 a 气候平均，σ 为变量场气候标准差，一般$|D_s| \geqslant 3\,\sigma$表示存在较明显异常 (杨舒楠和端义宏, 2020)。另外，本文将广州区域设定为 113°—114°E, 22.5°—24.0°N。

2 强降水实况

台风“海葵”具有生命史长、多次登陆、残涡滞留等特点，其 2023 年 8 月 28 日在西北太平洋洋面生成后一路西偏北行，9 月 5 日先后在福建、广东沿海登陆后继续西行深入广东内陆，9 月 6 日停止编号后其残余涡旋长时间滞留在广东境内，缓慢向西移动。受“海葵”本体环流影响，9 月 4—6 日，广东东部的潮州、汕头、揭阳、汕尾、梅州、河源出现暴雨到大暴雨，最大累积雨量出现在汕头市南澳岛黄花山站，达 248 mm (图 1a)；9 月 7—8 日，受停止编号后的“海葵”残涡影响，降水增强、强降水范围增大，广东东部至珠江三角洲 (以下简称为珠三角) 出现大范围暴雨到大暴雨、局部特大暴雨，有 67 个国家站和区域站累积雨量超过 400 mm (最大出现在深圳市罗湖区小梧桐站，达 615.9 mm) (图 1b)；9 月 9—11 日，随“海葵”残涡继续缓慢西行，强降水区也随之西移至广东西部的江门、阳江、茂名和湛江一带，有 74 个国家站和区域站累积雨量超过 400 mm (最大出现在阳江市阳西县沙扒中学站，达 710.8 mm) (图 1c)。

综上，“海葵”影响广东期间，暴雨阶段性特征显著，其残涡造成的降水范围和强度均远超于本体。而广州的极端降水正是出现在“海葵”停止编号后残涡影响的 9 月 7—8 日。广州是本次过程的主要强降水中心，本次过程也是广州近 10 a 第三强的暴雨过程，影响程度达到特别严重等级，具有累积雨量大、降水范围广、降水极端性强、持续时间长、夜雨明显的特点。全市平均过程雨量 199.3 mm，有 13 个站点累积雨量超过 400 mm，番禺区南村镇梅山村测得全市最大过程雨量 469.9 mm；全市大暴雨和特大暴雨覆盖率分别为 87.7% 和 40.5%，番禺、天河和海珠区的 6 h、12 h 和 24 h 雨量突破本区历史极值；20 mm·h^{-1} 以上的短时强降水持续长达 13 h，50 mm·h^{-1} 以上的强降水持续时间达 9 h，且主要集中在 9 月 7 日夜间至 8 日上午 (图 1d)。具有一定持续性的短时强降水是造成广州降水极端性的重要原因。

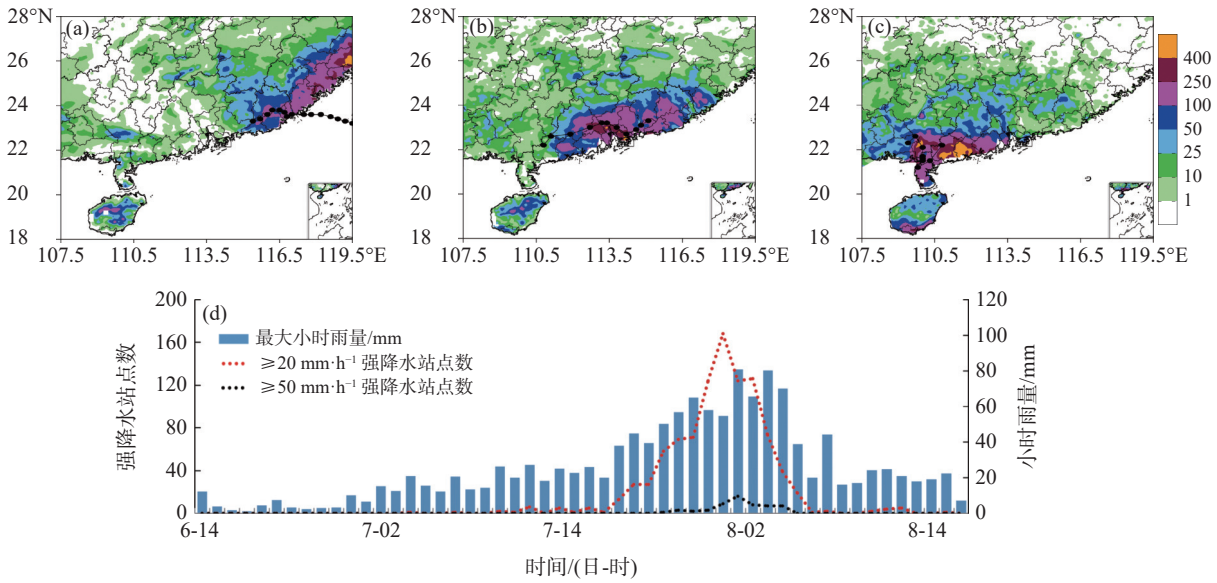


图 1 2023 年 9 月 3 日 20 时—6 日 20 时 (a)、6 日 20 时—8 日 20 时 (b)、8 日 20 时—11 日 20 时 (c) 累积雨量 (填色，单位：mm) 分布以及 6 日 14 时—8 日 17 时广州市最大小时雨量和≥20 mm·h^{-1}、≥50 mm·h^{-1} 强降水站点数的逐时变化 (d) (图 a 中黑色圆点为“海葵”及其残涡路径)

Fig. 1 Accumulated precipitation (unit: mm) from (a) 20:00 BT on 3 to 20:00 BT on 6 September, (b) 20:00 BT on 6 to 20:00 BT on 8, (c) 20:00 BT on 8 to 20:00 BT on 11, (d) time series of maximum hourly rainfall and number of stations with rainfall intensity over 20 mm·h^{-1} and 50 mm·h^{-1} in Guangzhou from 14:00 BT on 6 to 17:00 BT on 8 September, 2023 (The black dots denote "Haikui" and residual vortex track in Fig. 1a)

3 大尺度环流背景及物理量异常特征

3.1 大尺度环流背景

由 500 hPa 环流 (图略) 可知, 在“海葵”停止编号后, 我国大部-西北太平洋均被强盛的副高控制, 且副高逐日西伸加强, “海葵”残涡始终在副高环流内移动, 9 月 6 日 20 时残涡位于珠江口以东的惠州境内, 9 月 7 日 20 时西移至广州境内, 9 月 8 日 20 时进入珠江口以西的茂名境内, 即弱的引导气流导致残涡移动缓慢, 使其在珠三角一带长时间滞留超过 40 h, 是导致持续性强降水形成的直接原因。

诸多研究表明, 大尺度环流与台风登陆后造成的强降水有密切联系 (董美莹等, 2009; 姚丽娜等, 2013)。9 月 7—8 日, 在广东境内长时间维持的“海葵”残涡东侧不断有低层西南气流卷入, 最大风速为 10~12 m·s^{-1}, 同时还有一支强盛的偏东气流与其在珠三角交汇 (图 2a), 最大风速达到 16 m·s^{-1}, 广州低层处于明显的辐合风场中, 而这两支低空急流也是本次极端降水的主要水汽来源, 其水汽源地分别位于孟加拉湾和西北太平洋, 中心的水汽通量强度均超过 25 g·hPa^{-1}·cm^{-1}·s^{-1} (图 2b), 广州始终处于水汽通量辐合大值区, 辐合强度达到−16×10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1} (图 2c)。虽然 9 月已过夏季风盛期, 但在此次过程中, 西南季风却异常强盛, 它与偏东急流一起供应丰富的水汽和能量, 致使“海葵”残涡长时间维持, 也为持续性强降水的发生发展提供了有利的水汽条件。

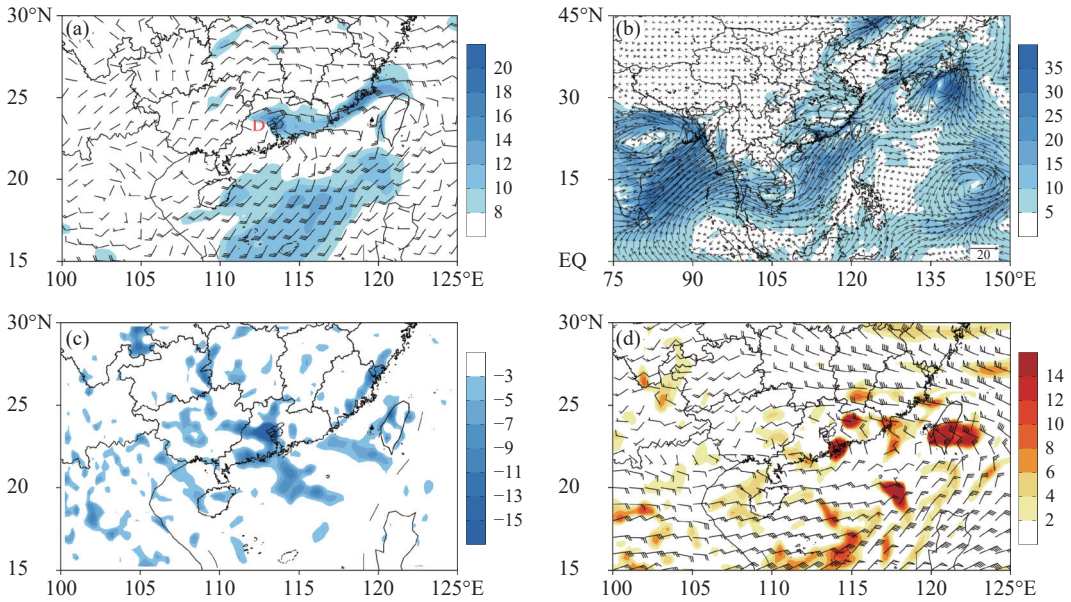


图 2 2023 年 9 月 8 日 02 时 925 hPa 风场 (风向杆和填色, 单位: m·s^{-1}) (a)、水汽通量 (矢量箭头和填色, 单位: g·hPa^{-1}·cm^{-1}·s^{-1}) (b)、水汽通量散度 (单位: 10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}) (c) 和 200 hPa 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 及散度场 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) (d) (图 a 中 D 代表“海葵”残涡中心)

Fig. 2 Distribution of (a) wind field (barbs and color-filled, unit: m·s^{-1}), (b) water vapor flux (vectors and color-filled, unit: g·hPa^{-1}·cm^{-1}·s^{-1}), (c) water vapor flux divergence (unit: 10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}) at 925 hPa, and (d) wind field (barbs, unit: m·s^{-1}) and divergence (color-filled, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 200 hPa at 02:00 BT on 8 September, 2023 (The D denotes the center of "Haikui" residual vortex in Fig. 2a)

在高层 200 hPa, 南亚高压中心稳定维持在珠三角地区上空, 广州高层为强辐散中心, 辐散强度超过 12×10^{-5} s^{-1} (图 2d), 高层辐散区与低层辐合区相互耦合导致强的抽吸效果, 为强降水的发生发展提供了有利的上升运动条件。

3.2 物理量异常特征

本次降水过程极端性强, 广州多区出现站点打破各区不同小时雨量纪录的情况。有利的大尺度环流形势稳定维持是强降水发生的背景条件, 而降水极端性的出现也必定与大尺度环流的异常及其造成的物理量场的异常有关 (杨舒楠和端义宏, 2020)。因此, 下面针对本次极端降水过程的环流及物理量异常特征进行分析, 包括动力、水汽和热力条件, 以期寻找极端降水产生的可预报性信号。

暴雨通常发生在有利的高低空环流的耦合叠置区。“海葵”残涡影响期间, 广东上空高层为庞大的南亚高压控制, 相较于气候态, 200 hPa 位势高度场表现为中等偏强强度的正异常 (D_s 约 2~2.5 σ) (图 3a), 对应的 200 hPa 散度场在广州中南部存在非常明显的正异常 (D_s≥4 σ) 中心 (图 3b), 其异常程度超过 1818

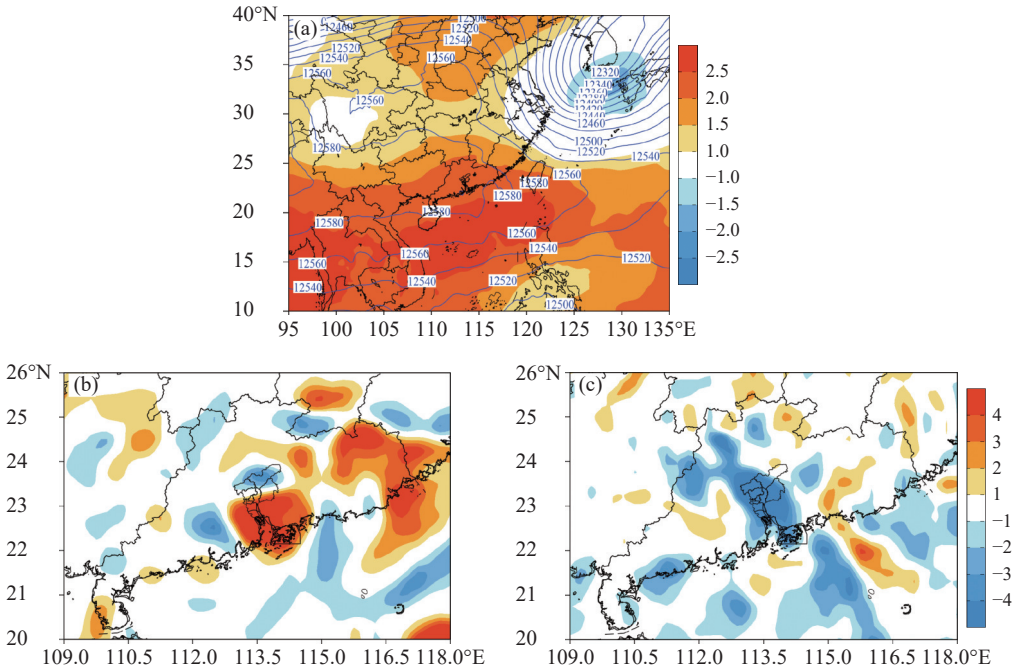


图 3 2023 年 9 月 7 日 23 时 200 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 及其标准化异常 (填色, 单位: σ) (a)、200 hPa (b) 和 925 hPa (c) 散度标准化异常

Fig. 3 (a) Geopotential height (contours, unit: dagpm) and standardized anomaly (color-filled, unit: σ) at 200 hPa, standardized anomaly of divergence at (b) 200 hPa and (c) 925 hPa at 23:00 BT on 7 September, 2023

号台风“温比亚”极端降水期间我国东部 200 hPa 位势高度场的异常强度 (杨舒楠和端义宏, 2020); 而在低层, 由于残涡的滞留, 925 hPa 散度场在广州大部表现为非常明显的负异常, 925 hPa 辐合 D_s 达−4 σ 以上 (图 3c)。即在残涡影响过程中, 动力场具有异常明显的极端性, 异常强盛的高层辐散与低层辐合共同配合, 为极端降水的发生提供了十分有利的动力抬升条件。

进一步分析低层风场 (图 4) 可见, 925 hPa 的纬向风场在广州附近表现为明显的东、西风辐合, 东、西风 D_s 分别达到−2.9 σ 和 2.1 σ 以上, 而经向风场在广州中南部存在中等强度 (D_s 约 1.3~2.1 σ) 的正异常中心, 表明偏南暖湿气流较气候平均态偏强。因此, 异常强盛的西南气流和偏东气流在广州附近交汇, 不仅能够导致显著的辐合抬升运动, 且双通道强盛的水汽输送还带来充沛的水汽和暖湿不稳定能量, 对极端降水的产生至关重要。

充分的水汽供应是暴雨形成的必要条件。对比 2023 年“龙舟水”期间 (5 月 21 日—6 月 20 日)、9 月上半月 (9 月 1—15 日) 和 9 月 7—8 日三个时段的整层大气可降水量 (图略), 发现珠三角在这三个时段都是整层大气可降水量的大值中心, 9 月上半月珠三角的整层大气可降水量达到 65 kg·m^{-2} 左右, 其值已超过“龙舟水”期间 (60 kg·m^{-2}), 在这种有利的气候背景下, 9 月 7—8 日珠三角的整层大气可降水量更是高达 70 kg·m^{-2} 以上, 接近 1804 号台风“艾云尼”引发广东持续性强降水期间的整层大气可降水量 (杨舒楠等, 2021), 而广州水汽尤其充沛, 整层大气可降水量 D_s 达 2.5 σ 以上 (图 5a)。此外, 由于异常强盛的西南季风和偏东急流在广州附近交汇, 低层强的水汽通

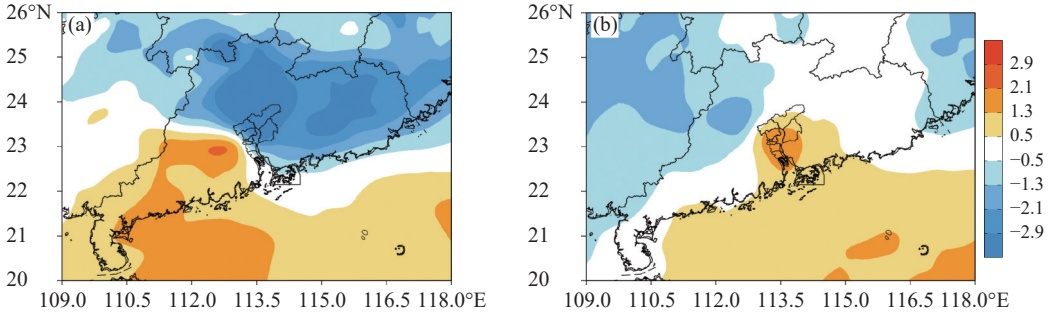


图 4 2023 年 9 月 8 日 02 时 925 hPa 的纬向 (a) 和经向 (b) 风场标准化异常 (单位: σ)

Fig. 4 Standardized anomaly (unit: σ) of (a) zonal and (b) meridional wind at 925 hPa at 02:00 BT on 8 September, 2023

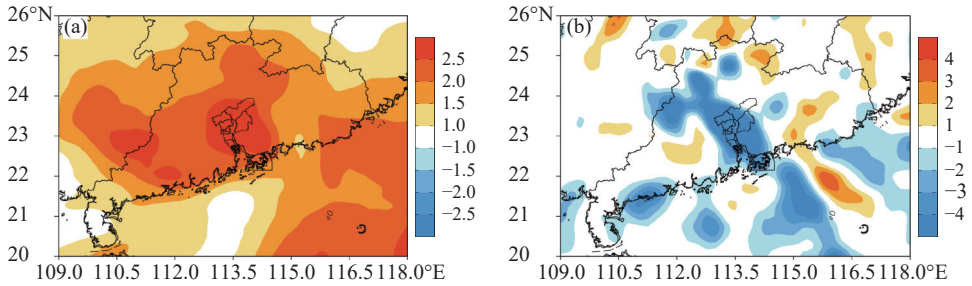


图 5 2023 年 9 月 7 日 23 时整层大气可降水量 (a) 和 925 hPa 水汽通量散度 (b) 标准化异常 (单位: σ)

Fig. 5 Standardized anomaly (unit: σ) of (a) total column water and (b) water vapor flux divergence at 925 hPa at 23:00 BT on 7 September, 2023

量辐合中心集中在广州, 925 hPa 水汽辐合强度 D_s 达−4 σ 以上 (图 5b), 表现为异常极端。因此, 本地异常充沛的水汽含量和极端强盛的水汽辐合为极端降水发生的提供了有利的水汽条件。

受强盛的水汽和能量输入影响, 广州具有高温、高湿、高能的环境条件。由广州区域平均的假相当位温时间-高度垂直剖面 (图 6a) 可见, 在强降水发生之前, 广州边界层的假相当位温已持续超过 352 K, 中心达到 357 K, 600 hPa 以下大气呈高温高湿的对流不稳定状态, 为强降水的出现提供了有利的热力背景条件。进一步对 850 hPa 假相当位温计算其标准化异常 (图 6b), 可见在强降水期间, 广州附近更是存在中等强度 (D_s 约为 1.5~2.5 σ) 的假相当位温正异常中心, 低层的辐合抬升运动在异常高温高湿的对流不稳定层结中强烈发展, 激发深厚对流, 有利于产生更高的降水效率。

郑凤琴等 (2021) 发现, 在广西出现台风极端降水过程时, 整层大气可降水量、850 hPa 水汽通量、200 hPa 散度和 700 hPa 垂直速度一般偏离气候态 2 倍标准差, 大气稳定度因子偏离气候态较小, 而在本次过程中, 无论是动力还是水汽因子, 其异常程度均偏离气候态两倍标准差以上, 热力因子也偏离气候态 1.5 倍标准差以上。因此, 各种异常有利的动力、水汽和热力不稳定条件共同配合导致了本次极端降水的发生。

4 夜雨明显的中尺度特征

4.1 低空急流发生发展和维持特征

由前文分析可知, 本次过程的强降水主要出现在 9 月 7 日夜间至 8 日上午, 夜雨特征明显。9 月 7—8 日, 伴随“海葵”残涡的缓慢西行, 广州逐渐转受残涡东侧的偏南气流影响, 通过分析强降水中心的番禺国家站的风场时间-高度垂直剖面 (图 7a) 可见, 9 月 6 日夜间至 7 日白天番禺站中低层以残涡西侧的偏北风为主, 且风速持续减弱, 9 月 7 日 20 时左右开始转为残涡东侧的偏南风, 同时由于低层偏东急流的加入, 风速逐渐加强且大风区向高层延伸, 中低层均是风速超过 12 $m\cdot s^{-1}$ 的急流区, 并持续至 9 月 8 日白天才逐渐减弱。研究表明, 低空急流通过输送暖湿气流为暴雨区提供有利的动力、热力和水汽条件 (Chen et al., 2017; Du and Chen, 2019)。9 月 7 日夜间, 随着低层急流的增强和辐合使得大气中能量不断累积, 广州低层存在等假相当位温线密集区, 即中尺度能量锋区, 且在能量锋区附近锋生函数为正值, 即伴随锋生现象 (图 7b); 同时广州存在强盛且深厚的垂直上升运动, 中心强度达到−1.4 $Pa\cdot s^{-1}$ (图 7c), 即

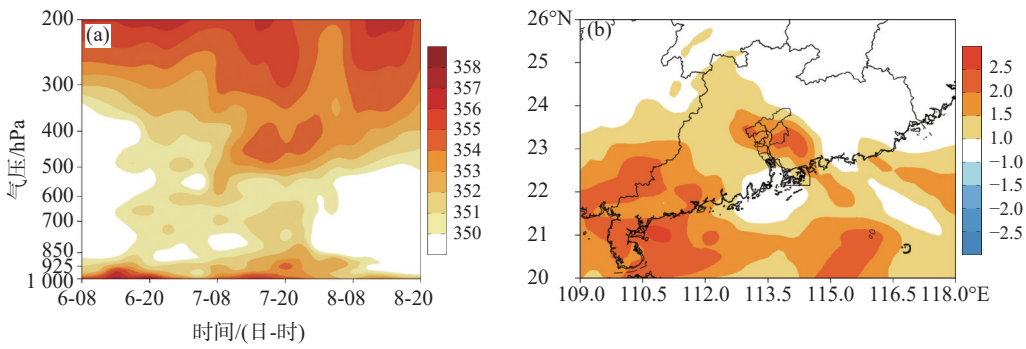


图 6 2023 年 9 月 6 日 08 时—8 日 20 时广州区域平均的假相当位温 (单位: K) 时间-高度垂直剖面 (a) 和 9 月 7 日 23 时 850 hPa 假相当位温标准化异常 (单位: σ) (b)

Fig. 6 (a) Time-pressure cross section of pseudo equivalent potential temperature (unit: K) averaged over Guangzhou from 08:00 BT on 6 to 20:00 BT on 8 September, and (b) standardized anomaly (unit: σ) of pseudo equivalent potential temperature at 850 hPa at 23:00 BT on 7 September, 2023

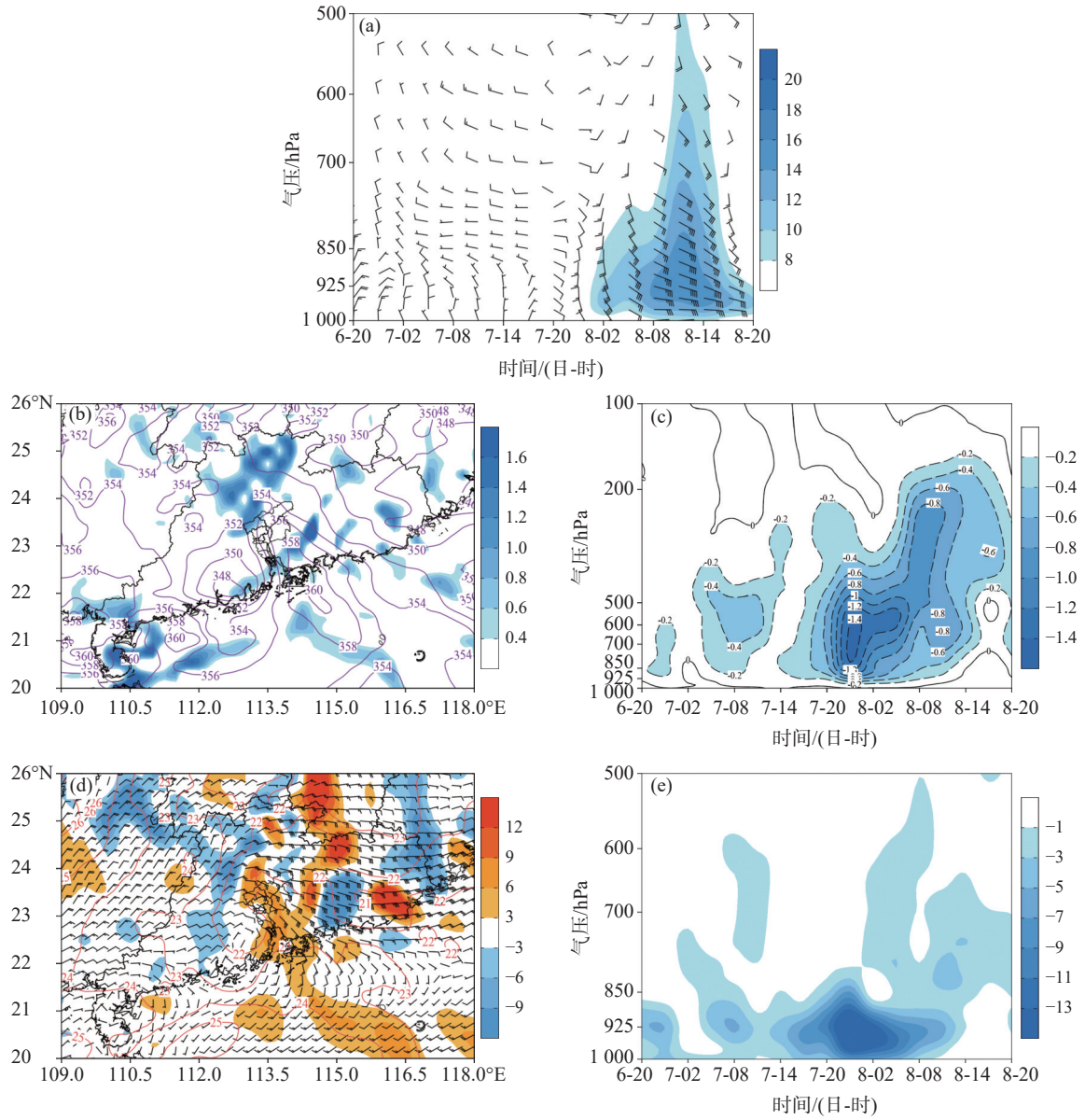


图 7 广州番禺国家站 2023 年 9 月 6 日 20 时—8 日 20 时风场 (风向杆和填色, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 时间-高度垂直剖面 (a)、9 月 7 日 20 时 925 hPa 假相当位温 (等值线, 单位: K) 及锋生函数 (填色, 单位: $10^{-9}\ K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) (b)、9 月 6 日 20 时—8 日 20 时广州区域平均的垂直速度 (填色和等值线, 单位: $Pa\cdot s^{-1}$) 时间-高度垂直剖面 (c)、9 月 7 日 20 时 925 hPa 温度平流 (填色, 单位: $10^{-5}\ K\cdot s^{-1}$)、温度 (等值线, 单位: ℃) 及风场 (风向杆, 单位: $m\cdot s^{-1}$) (d)、9 月 6 日 20 时—8 日 20 时广州区域平均的水汽通量散度 (单位: $10^{-5}\ g\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$) 时间-高度垂直剖面 (e)

Fig. 7 (a) Time-pressure cross section of wind (barb and color-filled, unit: $m\cdot s^{-1}$) at Panyu national meteorological observation station from 20:00 BT on 6 to 20:00 BT on 8 September, (b) pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit: K) and frontogenesis function (color-filled, unit: $10^{-9}\ K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) at 925 hPa at 20:00 BT on 7 September, (c) time-pressure cross section of vertical velocity (color-filled and contour, unit: $Pa\cdot s^{-1}$) averaged over Guangzhou from 20:00 BT on 6 to 20:00 BT on 8 September, (d) temperature advection (color-filled, unit: $10^{-5}\ K\cdot s^{-1}$), temperature (contour, unit: ℃) and wind field (barb, unit: $m\cdot s^{-1}$) at 925 hPa at 20:00 BT on 7 September, and (e) time-pressure cross section of water vapor flux divergence (unit: $10^{-5}\ g\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$) averaged over Guangzhou from 20:00 BT on 6 to 20:00 BT on 8 September, 2023

中尺度能量锋区的形成有利于广州强降水的触发。此外, 9 月 7 日夜间广州维持着较强的暖平流输送 (图 7d), 一支来自南海北部, 由西南季风带来, 一支来自东部沿海, 由低层偏东急流带来, 强暖平流的输送导致不稳定能量得以持续补充, 有利于大气层结不稳定状态的维持。在“海葵”残涡、西南季风和低层偏东急流的共同作用下, 有充沛的水汽向广州输送, 9 月 7 日夜间广州低层的水汽辐合显著增强, 925 hPa 附近出现水汽通量辐合中心, 强度超过−13×10^{-5} $g\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$, 与降水最强时段对应 (图 7e)。因此, 低空急流发展造成的动力、热力和水汽条件在 9 月 7 日夜间的转强和持续是本次过程夜雨明显的重要诱因。

4.2 中尺度对流系统的演变特征

在高湿、高能的环境条件下, 受到“海葵”残涡和低空急流发展辐合的动力触发, 广州中尺度对流系统十分活跃, 伴随长时间持续的中尺度对流的发生、发展。由广东 S 波段多普勒天气雷达组合 Z_H (图 8a) 可见, 9 月 7 日 20 时—8 日 00 时, 残涡中心位于广州—佛山中部偏北一带, 广州中北部为大片层积混合云降水回波所覆盖, 其中镶嵌着小的对流性回波, 且生消速度快, 以移动性为主, 而广州南部为分散的弱对流; 9 月 8 日 00—06 时 (图 8b、c), 残涡向偏西方向缓慢移动, 广州北部降水回波逐渐减弱, 随着“海葵”残涡东侧的西南气流加强和低层偏东急流建立, 广州中南部原先分散的回波不断发展、加强、合并, 中尺度对流的组织化特征明显增强, 形成范围较广的混合型降水回波, 大部分回波反射率因子强度达到 35 dBz 以上, 最强超过 50 dBz, 同时广州中南部近地面存在着偏南风、偏东风与偏北风的辐合, 构成长度约为 100 km 的准东西向 β 中尺度辐合线, 且维持较长时间, 强降水回波在辐合线附近发展、加强、停滞, 具有明显的后向传播特征, 形成列车效应, 引发持续长时间的短时强降水, 期间降水强度均在 50 mm·h^{-1} 以上, 最大小时雨强达到 81 mm。9 月 8 日 06 时以后 (图 8d), 随着残涡中心进一步西移至茂名境内, 主要的对流系统也随之西移出广州, 广州降水逐渐减弱。

沿图 8c 中 AB 黑色实线作雷达组合反射率因子的垂直剖面 (图 9) 可见, 在 9 月 7 日夜间至 8 日上午强降水期间, 不低于 20 dBz 的回波顶高位于 10 km 附近, 对流整体发展旺盛, 但 45 dBz 以上的强回波主要出现在 6 km 高度、0 ℃ 以下, 回波质心低, 属于热带海洋型降水回波, 以暖云降水为主。9 月 8 日白天, 回波强度和发展高度均逐渐减弱。因此本次极端降水过程为层积混合型降水回波、持续时间长的台风热带型降水。

4.3 雷达双偏振参量特征

双偏振雷达能够改进降水估计和对降水系统内部水凝物粒子的相态识别能力。Z_{DR} 值与降水粒子大小、形状的扁圆程度密切相关, 对于液态降水而言, Z_{DR} 越大, 表明降水粒子直径越大, 大雨滴对应 Z_{DR} 达 3~5 dB; 液态降水粒子数量越多, K_{DP} 值越大, 与降水几乎呈线性关系 (王洪等, 2018; 翁佳烽等, 2024)。

而 X 波段双偏振相控阵雷达由于波长较短, 其双偏振参量对降水强度变化更加敏感, 能够更好指示降水强度和位置的变化。由番禺 X 波段双偏振相

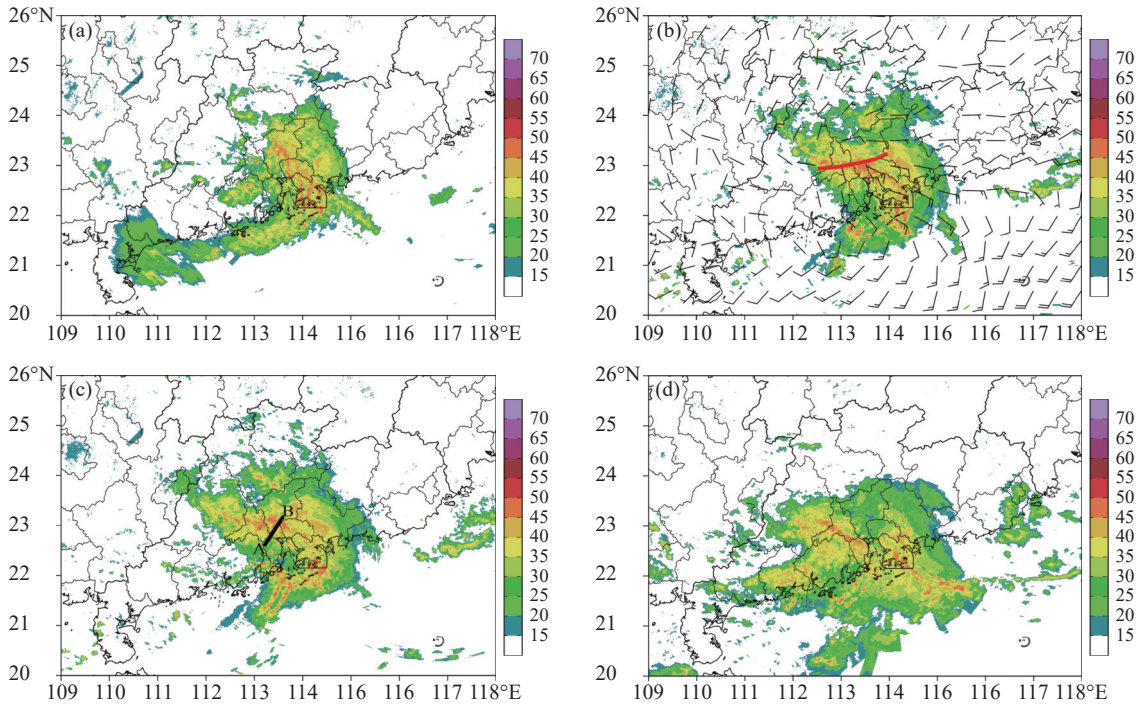


图 8 2023 年 9 月 7 日 22 时 (a)、8 日 02 时 (b)、8 日 03 时 (c) 和 8 日 09 时 (d) 广东 S 波段多普勒天气雷达组合 Z_H (填色, 单位: dBz) 分布 (图 b 中风向杆为 8 日 02 时 1 000 hPa 风场, 红色实线为辐合线; 图 c 中黑色实线 AB 为 (113.2°E, 22.6°N)—(113.6°E, 23.2°N) 的剖线)

Fig. 8 Distribution of Z_H (color-filled, unit: dBz) from Guangdong S-band Doppler radar at (a) 22:00 BT on 7, (b) 02:00 BT on 8, (c) 03:00 BT on 8 and (d) 09:00 BT on 8 September, 2023 (The barbs in Fig. 8b denote wind field at 1 000 hPa at 02:00 BT on 8, and the red solid line denotes converging line. The black solid line AB in Fig. 8c denotes the cross line from (113.2°E, 22.6°N) to (113.6°E, 23.2°N))

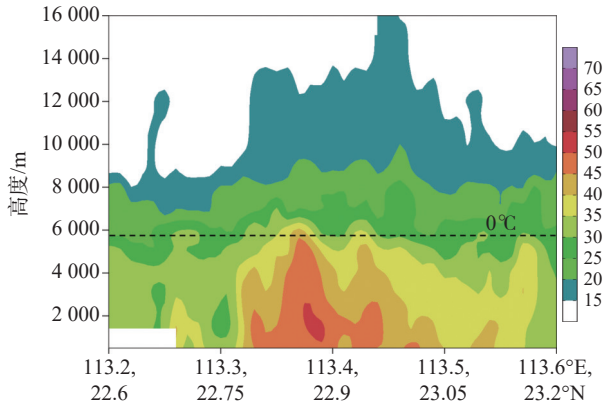


图 9 2023 年 9 月 8 日 03 时广东 S 波段多普勒天气雷达组合 Z_H (单位: dBz) 沿图 8c 中黑线 AB 的垂直剖面 (黑色虚线为 0 ℃ 层高度线)

Fig. 9 Cross section of radar Z_H (unit: dBz) from Guangdong S-band Doppler radar along black line AB in Fig. 8c at 03:00 BT on 8 September, 2023 (The black dotted line denotes the zero-degree layer)

控阵雷达的 0.9°仰角 Z_{DR} 和 K_{DP} (图 10a、b) 可见, 在强降水期间, 强回波 (不低于 35 dBz) 影响的广州中南部 Z_{DR} 维持在 1~3 dB, 表明降水粒子直径较小, 以中小雨滴为主; K_{DP} 普遍在 1 °·km^{-1} 以上, 广州番禺和南沙区 K_{DP} 更是超过 3 °·km^{-1}, 最大达到 12 °·km^{-1}, 表明低层存在大量中小雨滴, 粒子浓度高于广州其他区域, 累积雨量超过 400 mm 的区域也主要集中在番禺和南沙区, 即高浓度的中小雨滴是本次极端强降水的主要云微物理特征。从 K_{DP} 的垂直剖面 (图 10c) 可见, K_{DP} 柱 (0 ℃ 层以上不低于 0.75 °·km^{-1}) 伸展高度接近 6 km, 略高于 0 ℃ 层高度, 但中低层 K_{DP} 大值区分布宽广, 表明强回波伸展高度虽不高, 且降水主要以尺度较小的雨滴粒子为主, 但雨滴粒子在中低层浓度高、且范围较大, 为典型的暖云降水特征, 降水效率高。

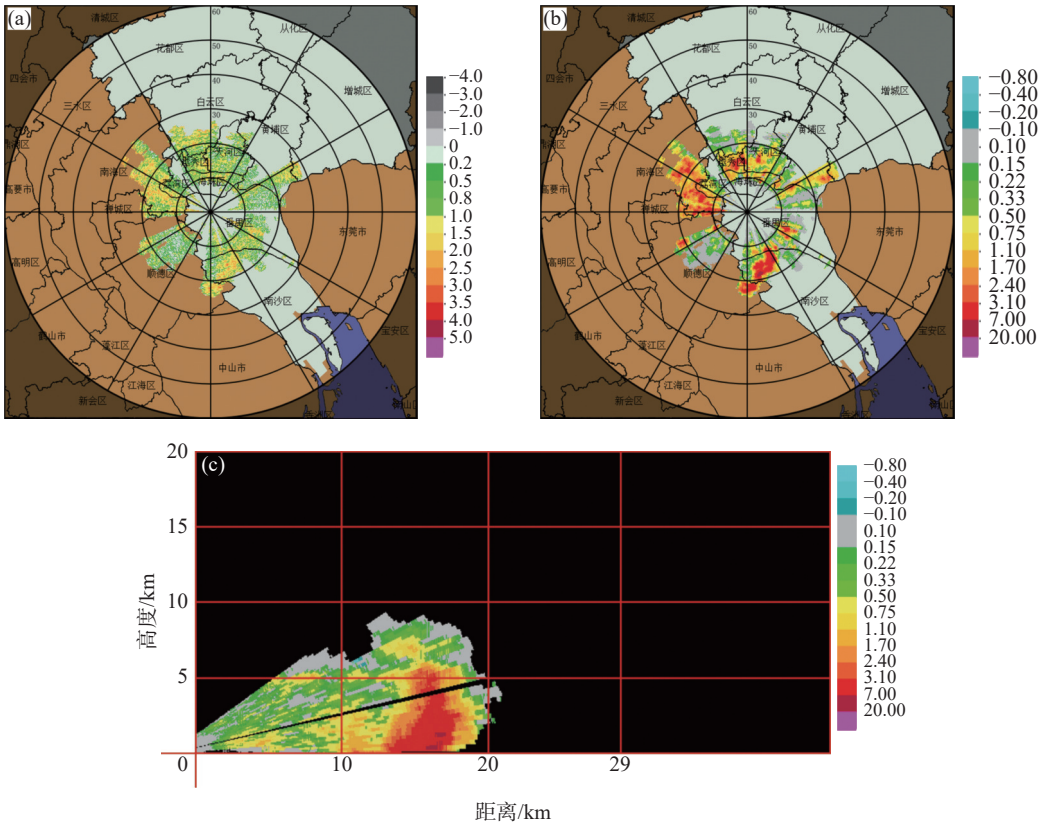


图 10 2023 年 9 月 8 日 03 时番禺 X 波段双偏振相控阵雷达 0.9°仰角差分反射率 Z_{DR} (a)、差分传播相移率 K_{DP} (b) 分布和 K_{DP} 的垂直剖面 (c) (图 a 和 b 灰色、棕色和深蓝色底色分别代表广州、非广州区域和海洋)

Fig. 10 Distribution of (a) Z_{DR}, (b) K_{DP} and (c) section of K_{DP} on 0.9°elevation from Panyu X-band dual-polarization phased array radar at 03:00 BT on 8 September, 2023 (The gray, brown and dark blue backgrounds denote Guangzhou, non-Guangzhou areas and the sea, respectively in Fig. 10a and Fig. 10b)

5 结论与讨论

本文利用常规观测资料、热带气旋最佳路径数据集、雷达、再分析资料等多源资料, 从大尺度环流背景及物理量异常特征, 以及夜雨明显的中尺度特征及成因等方面, 对台风“海葵”残涡引发广州极端降水进行诊断分析, 得到以下主要结论:

(1) 本次过程广州 20 mm·h^{-1} 和 50 mm·h^{-1} 以上的短时强降水持续时间分别长达 13 h 和 9 h, 最大小时雨强达到 80 mm·h^{-1} 以上。较高的降水效率和较

长的持续时间造成极端降水的产生。

(2) “海葵”残涡在广东境内长时间滞留、强盛的西南季风与偏东急流输送水汽和暖湿不稳定能量、多支气流的交汇和稳定维持是本次极端降水形成的大尺度环流背景; 同时配合高层南亚高压的辐散抽吸作用, 造成低层辐合和抬升运动的加强, 为极端降水提供了有利的动力条件。

(3) 本次过程中 200 hPa 辐散、925 hPa 辐合和 925 hPa 水汽通量辐合在广州均偏离气候平均态 4 倍标准差以上, 即动力和水汽因子均表现为异常极端; 热力条件方面, 假相当位温在广州存在中等强度的正异常中心, 为极端降水的发生提供了高温、高湿、高能的环境背景。因此, 动力、水汽和热力因子的标准化异常可以较好地解释降水极端性的形成, 极端降水的发生基于各种异常有利条件的共同配合。

(4) 9 月 7 日夜间至 8 日上午, 广州低层急流的加强、中尺度能量锋区的触发、暖平流输送和边界层水汽辐合的显著增强是夜雨明显的重要诱因。本次极端降水过程是长时间持续的层积混合云降水, 列车效应和暖云降水特征显著, 高浓度中小雨滴是主要的云微物理特征。

本文分析了环流背景及其物理量异常与台风残涡降水量异常的相关性, 讨论了台风残涡夜雨成因以及中尺度对流系统对台风残涡极端降水的作用, 但极端降水的影响因素复杂, 比如地形对降水的增幅作用以及城市下垫面的强迫效应, 这均需要高分辨率数值模拟进一步验证。此外, 客观数值模式对本次过程均有不同程度的漏报, 且根据可预报性演变指数来看, 本次过程模式预报稳定性差、可信度低, 未来将找出模式预报偏差的可能原因, 对模式进行有效订正和改进, 进一步提高台风残涡降水的预报预警服务能力。

参考文献 (References):

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]. Torrential Rain and Disasters,33(1):19−25 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2014.01.003

陈联寿,许映龙.2017.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,40(1):3−10. Chen L S, Xu Y L. 2017. Review of typhoon very heavy rainfall in China [J]. Meteorological and Environmental Sciences,40(1):3−10 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2017.01.001

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]. Transactions of Atmospheric Sciences,48(1):77−92 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240418002

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]. Journal of Applied Meteorological Science,35(1):1−16 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20240101

董美莹,陈联寿,郑沛群,等.2009.登陆热带气旋暴雨突然增幅和特大暴雨之研究进展[J].热带气象学报,25(4):495−502. Dong M Y, Chen L S, Zheng P Q, et al. 2009. Research progress on abrupt intensification of heavy rainfall and super heavy rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Journal Tropical Meteorology,25(4):495−502 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4965.2009.04.016

龚俊强,叶妍婷,蔡晓冬,等.2023.一次近海快速增强型台风引发金华东部极端强降水成因分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):154−161. Gong J Q, Ye Y T, Cai X D, et al. 2023. Cause analysis on extreme rainfall in eastern Jinhua caused by an offshore rapidly enhanced typhoon [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):154−161 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.020

何立富,陈双,郭云谦.2020.台风利奇马 (1909) 极端强降雨观测特征及成因[J].应用气象学报,31(5):513−526. He L F, Chen S, Guo Y Q. 2020. Observation characteristics and synoptic mechanisms of typhoon Lekima extreme rainfall in 2019 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(5):513−526 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200501

林良勋.2009.广东省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社:35 Lin L X. 2009. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province [M]. Beijing:Meteorological Press:35 (in Chinese)

陆秋霖,林确略,李秀昌,等.2024.广西东南部“海葵”残涡特大暴雨成因初探[J].沙漠与绿洲气象,18(4):1−8. Lu Q L, Lin Q L, Li X C, et al. 2024. Analysis of the causes of torrential rainfall event associated with the residual vortex of “Haikui” in southeastern Guangxi [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(4):1−8 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.001

卢珊,王黎娟,管兆勇,等.2012.低纬季风涌影响登陆台风“榴莲” (0103) 和“碧利斯” (0604) 暴雨增幅的比较[J].大气科学学报,35(2):175−185. Lu S, Wang L J, Guan Z Y, et al. 2012. Comparison of impacts of low-latitude monsoon surge on the enhanced rainstorm from landing typhoons Durian and Bilis [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,35(2):175−185 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2012.02.006

宋雯雯,李国平,叶瑶.2024.基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析[J].暴雨灾害,43(1):13−22. Song W W, Li G P, Ye Y. 2024. Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):13−22 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−221

孙军,谌芸,杨舒楠,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二) 极端性降水成因初探及思考[J].气象,38(10):1267−1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part Ⅱ: Preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteorological Monthly,38(10):1267−1277 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.

10.013

王洪,吴乃庚,万齐林,等.2018.一次华南超级单体风暴的 S 波段偏振雷达观测分析[J].气象学报,76(1):92−103. Wang H, Wu N G, Wan Q L, et al. 2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(1):92−103 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.083

王楠喻,王雪,娄盼星,等.2021.台风“利奇马”引发山东强降水成因分析[J].海洋气象学报,41(1):119−128. Wang N Y, Wang X, Lou P X, et al. 2021. Analysis on causes of heavy precipitation by Typhoon LEKIMA in Shandong [J]. Journal of Marine Meteorology,41(1):119−128 (in Chinses). doi:10.19513/j.cnki.issn2096−3599.2021.01.012

翁佳烽, 梁晓媛, 罗斌, 等.2024.广东省中部一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J].气象与环境科学,47(6):1−8. Weng J F, Liang X Y, Luo B, et al. 2024. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations in central Guangdong Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences,47(6):1−8 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2024.06.001

杨舒楠,端义宏.2020.台风温比亚 (1818) 降水及环境场极端性分析[J].应用气象学报,31(3):290−302. Yang S N, Duan Y H. 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of typhoon Rumbia in 2018 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(3):290−302 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200304

杨舒楠,路屹雄,张芳华,等.2021.热带风暴艾云尼持续性强降水成因分析[J].气象,47(1):106−116. Yang S N, Lu Y X, Zhang F H, et al. 2021. Analysis on causes of persistent heavy rainfall brought by tropical storm Ewiniar [J]. Meteorological Monthly,47(1):106−116 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.01.010

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]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

杨晓亮,杨敏,金晓青,等.2024. “23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,43(1):1−12. Yang X L, Yang M, Jin X Q, et al. 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−191

姚丽娜,曾明剑,韩桂荣,等.2013.台风登陆衰减后造成降水加强的概况[J].气象科学,33(1):77−82. Yao L N, Zeng M J, Han G R, et al. 2013. Summary of causing increase in precipitation by landfalling weakened tropical cyclone [J]. Journal of the Meteorological Sciences,33(1):77−82 (in Chinese). doi:10.3969/2012jms.0084

姚丽娜,吴海英,韩桂荣,等.2017.热带气旋衰减后造成区域性暴雨的气候特征及分型研究[J].暴雨灾害,36(5):453−459. Yao L N, Wu H Y, Han G R, et al. 2017. Study on the climatic characteristics and classification of regional rainstorms caused by weakened tropical cyclones [J]. Torrential Rain and Disasters,36(5):453−459 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.05.007

姚日升,涂小萍,俞芳芳,等.2018. 1614 号超强台风“莫兰蒂”在浙江沿海降水预报偏小的原因[J].热带气象学报,34(5):637−644. Yao R S, Tu X P, Yu F F, et al. 2018. Reasons for rainfall underestimation of the super typhoon 1614 (Meranti) at coastal Zhejiang Province [J]. Journal Tropical Meteorology,34(5):637−644 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2018.05.006

郑凤琴,王盛繁,赵金彪,等.2021.广西台风极端强降水特征及环境参数异常性分析[J].气象研究与应用,42(4):07−13. Zheng F Q, Wang S F, Zhao J B, et al. 2021. Analysis on the characteristics of typhoon extreme precipitation and the anomaly of environmental parameters in Guangxi [J]. Journal Meteorological Research and Application,42(4):07−13 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45−1356/P.2021.4.02

周懿,郭云云,余芳.2020.四川盆地一次西风槽和台风共同作用暴雨过程分析[J].高原山地气象研究,40(2):11−17. Zhou Y, Guo Y Y, Yu F. 2020. Analysis of a rainstorm process under the joint action of westerly trough and typhoon in Sichuan Basin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,40(2):11−17 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184·2020.02.002

Bao X, Davidson N E, Yu H, et al. 2015. Diagnostics for an extreme rain event near Shanghai, during the landfall of Typhoon Fitow (2013) [J]. Monthly Weather Review,143(9):3377−3405. doi:10.1175/MWR−D−14−00241.1

Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences,27(5):967−976. doi:10.1007/s00376−010−8171−y

Chen G X, Sha W M, Iwasaki T, et al. 2017. Diurnal cycle of a heavy rainfall corridor over East Asia [J]. Monthly Weather Review,145(8):3365−3389. doi:10.1175/MWR−D−16−0423.1

Du Y, Chen G X. 2019. Climatology of low-level jets and their impact on rainfall over southern China during the early-summer rainy season [J]. Journal of Climate,32(24):8813−8833. doi:10.1175/JCLI−D−19−0306.1

Su Z, Ren F, Wei J, et al. 2015. Changes in monsoon and tropical cyclone extreme precipitation in Southeast China from 1960 to 2012 [J]. Tropical Cyclone Research and Review,4(1):12−17. doi:10.6057/2015TCRR01.02

(责任编辑 唐国瑛)