

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. Convection structure and impact on severe precipitation during landing of Typhoon Lekima[J]. Meteor Mon, 47(12):1433-1443(in Chinese).

台风利奇马登陆期间的对流结构特征 及对强降雨影响^{*}

陈 涛^{1,2,3} 董 林^{1,2} 罗 玲⁴ 杨舒楠^{1,2,3}

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082

4 浙江省气象台,杭州 310000

提 要: 2019 年 9 号台风利奇马在浙江造成极端降水,其中 8 月 9 日白天浙江东部受台风外围螺旋雨带长时间影响,9 日夜间在台风内核对流影响下降水有显著增强;降水中心与浙江临海地区的天台山、括苍山和雁荡山等地形特征密切相关。GPM (Global Precipitation Measure) 卫星遥感反演表明近岸台风螺旋雨带以层积混合型降水为主,台风眼墙区域以热带暖云对流型降水为主;眼墙区雨滴有效直径更大、雨滴数密度更高,有利于形成高降水强度。台风登陆前移动速度较慢,浙江沿海地区维持低层锋生和辐合,有利于外围螺旋雨带降水维持和增强;登陆前后受环境垂直切变等因素影响,台风中心左前侧眼墙区域对流活跃,在登陆点附近强降水区偏向于台风中心左侧。分钟级降水观测表明台风登陆期间浙江近海山区降水强度 2~3 倍于平原地区,其中地形性降水增幅效应与台风对流非对称结构差异对降水影响程度基本相当,有利于在台风中心左前侧的括苍山—雁荡山山区形成强降水中心。

关键词: 台风暴雨,螺旋雨带,眼墙,垂直切变,地形

中图分类号: P447, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.12.001

Convection Structure and Impact on Severe Precipitation During Landing of Typhoon Lekima

CHEN Tao^{1,2,3} DONG Lin^{1,2} LUO Ling⁴ YANG Shunan^{1,2,3}

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydro-Meteorological Studies, Beijing 100081

3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

4 Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310000

Abstract: Extreme precipitation struck Zhejiang Province induced by Typhoon Lekima in 2019. It was found that the spiral rainbelt staggering on the coast of Zhejiang Province during the daytime of 9 August, and rainfall was enhanced significantly due to inner-core convection during Lekima's landing period over the night. Rainfall centers were significantly related to the near-shore of Tiantai Mountain, Kuocang Mountain and Yandang Mountain in Zhejiang Province. Based on analysis of GPM (Global Precipitation Measure) retrieval cloud parameters, Lekima's spiral rainbands were dominant by mixed cumulus-stratus precipitation, while eyewall was dominated by tropical warm cloud precipitation. With larger effective

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC150210 和 2019YFC151040)共同资助

2020 年 10 月 26 日收稿; 2021 年 10 月 21 日收修定稿

第一作者:陈涛,从事定量降水预报与中尺度对流系统诊断分析工作. E-mail:chentao@cma.gov.cn

diameter of raindrops and the higher density of raindrop particles, extreme rainfall intensity was formed in Lekima's eyewall. Spiral rainbelt was enhanced due to the low-level frontogenesis and coast convergence during the landing of Lekima. Lekima's inner-core convection was more intense on the left direction, leading to heavier rainfall on the left side of typhoon's landing position. By comparing precipitation rate evolution between mountainous and plain areas via statistics with minute-interval automatic weather station observation, it was preliminarily proved that the topographic rainfall enhancing mechanism and the asymmetric inner-core convective structure have almost the same impact on precipitation intensity, both favoring the asymmetrical rainfall concentrating on the left side to Lekima's forwarding direction.

Key words: typhoon heavy rain, spiral rainband, eye wall, vertical wind shear, topography

引言

登陆台风暴雨灾害风险大,在环境场、台风结构和地形等因素影响下台风暴雨形成机制复杂,一直以来是科研和业务预报中所面临的重点难点问题(陈联寿等,2004;林良勋等,2006;许映龙等,2011)。环境垂直切变对台风强度、对流非对称结构有重要影响,基于台风涡旋理想概念模型分析(Jones, 1995)、数值模拟位涡反演(Liu et al, 1999; Zhang et al, 2000)等方法表明,台风环境垂直切变指向的偏左侧位置有利于上升运动和对流发展,并得到卫星观测台风降水统计研究支持(Chen et al, 2006; Hence and Houze, 2011);对中国登陆台风的统计研究也认为垂直切变下游方向有利于对流发展(Shu et al, 2012; Yu et al, 2015)。近年来随着遥感观测技术发展,对台风螺旋雨带、眼墙对流等中小尺度特征研究进一步深入(费建芳等, 2013; 杨舒楠等, 2019; 高栓柱, 2020),台风风场的非均匀分布等因素对降水精细结构有重要影响。地形特征也深刻影响到登陆台风降水中心强度和分布,孟智勇等(1998)发现台风在地形作用下会产生诱生低压,影响强降水中心位置;陈联寿等(2004)指出华东登陆台风在山脉地形强迫作用下,可造成降水落区和雨量的非对称分布;Yu and Cheng(2013)认为地形能够影响云物理过程,对 2009 年台风莫拉克极端降水有重要作用。

2019 年 9 号台风利奇马(Lekima)是 2019 年登陆我国的最强台风,在 1949 年以来登陆我国大陆地区的台风中强度排名第五位,在登陆浙江的台风中排名第三位(王海平等, 2021)。受“利奇马”影响浙江东部地区降雨时间长、累积量大、极端性强,浙江省 6 个国家级气象站日降水量超过建站以来极值,

在台风非对称对流结构、浙江沿海天台山、括苍山、雁荡山地形等因素影响下,降水成因复杂,预报难度较大。本文基于多源数据分析台风利奇马登陆期间螺旋雨带、眼墙对流结构和云物理特征,重点分析环境垂直切变、地形等因素对台风降水分布影响,为台风精细化暴雨预报提供诊断分析思路。

1 数据与方法

本文采用国家气象信息中心整编全国区域级地面自动站分钟级观测、全国多普勒雷达拼图等观测数据,其中对地面风场、降水量通过 Cressman 客观分析,获取 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 格点化数据进行诊断。卫星数据包括 FY-4A 卫星 $10.8 \mu\text{m}$ 红外辐射亮温(水平分辨率为 4 km),并应用 GPM(Global Precipitation Measure)卫星双波段降水雷达(DPR,水平分辨率为 5.2 km,垂直分辨率为 250 m)观测数据对台风眼墙、螺旋雨带结构和云物理特征进行分析(Zhang and Fu, 2018)。

台风环流特征基于 ERA5 再分析数据(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,逐小时)进行诊断,计算锋生函数、环境垂直切变以及垂直差分涡度平流等物理量。水平锋生函数(FG)可分解为辐合项(FG1)和变形项(FG2)(Yang et al, 2014),FG1 代表风场辐合作用造成的锋生过程,FG2 代表在变形场中由于拉伸变形导致的锋生过程:

$$FG = \frac{d}{dt} |\nabla \theta| = FG1 + FG2$$

式中: θ 为位温;当 $FG > 0$ 时代表锋生。

取 V_{200} , V_{850} 为台风中心半径 200 km 以内区域平均风矢量,定义台风核心区域环境垂直切变 **VWS** 为:

$$\mathbf{VWS} = \mathbf{V}_{200} - \mathbf{V}_{850}$$

Frank and Ritchie(2001)利用数值模拟试验比较了不同强度 **VWS** 对台风结构的影响,研究表明 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱垂直切变持续作用 12 h,就足以使初始对称的台风环流形成显著非对称结构。Zhang and Kieu(2005)使用准平衡垂直运动方程诊断环境垂直切变影响,在忽略二阶微分项情况下,涡旋垂直运动方程简化为:

$$(\nabla^2 + \frac{f}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2})\omega \approx -\frac{f}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p}[-V \cdot (f + \xi)]$$

式中方程右侧为垂直差分相对涡度平流项。Jones (1995)利用理想正压涡旋概念模型表明,由于环境垂直切变造成涡旋轴倾斜以及涡旋高低层环流结构分离,环境垂直切变下游方向将形成差分涡度平流正中心,垂直切变上游方向为差分涡度平流负中心;在准地转约束条件下,垂直切变下游将产生低层辐合、高层辐散,垂直切变上游方向产生低层辐散、高层辐合,进而造成垂直运动的非对称分布;在平流作用下,涡旋对流上升运动将倾向于分布在垂直切变下游偏左侧位置。本文采用台风中心 200 km 半径内 200 hPa 与 850 hPa 的相对涡度平流差异,定性诊断登陆前后台风利奇马内核区域垂直运动分布特征。

2 台风利奇马降水和对流结构特征

2.1 天气环流形势和降水概况

2019 年第 9 号台风利奇马于 8 月 4 日(北京时,下同)下午在西太平洋洋面生成,7 日 23 时加强为超强台风。8 日 20 时台风利奇马位于西太平洋副热带高压西南侧(图 1),在副热带高压西侧的东南气流引导下向西偏北方向移动,由于环境引导气流较弱,台风移动速度仅为 $10 \sim 15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。FY-4A 红外云图上台风中心眼区边界清晰,眼墙结构密实;台风南侧云系与季风对流云带结合,受西南季风持续水汽输送影响,“利奇马”在登陆前始终保持在超强台风强度。10 日 01:45 超强台风利奇马在浙江温岭市沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为 $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中心最低气压为 930 hPa。“利奇马”登陆浙江后一路北上,先后影响我国华东、华北、东北等地区,在我国陆上强度维持在热带风暴及以上级别时间长达 44 h。

8 月 9 日白天台风利奇马向浙江沿海靠近,台

风前进方向上出现宽广的外围云系(图 2a),导致浙江沿海地区较早出现降水;台风中心具有内、外双眼墙结构,台风中心外眼墙左侧位置红外亮温低于 200 K,对流活动相对更为活跃。9 日 22 时浙江台山雷达观测表明(图 2b),台风螺旋雨带、同心双眼墙等特征与卫星观测基本一致,眼墙对流在台风前进方向的左侧发展更为旺盛,强回波在 45 dBz 左右。由于台风眼墙、螺旋雨带结构特征复杂,同时受浙江东部临海山地地形、海陆下垫面摩擦差异等因素影响,降水预报难度较高。

8 月 9—10 日受台风利奇马影响,浙江东部地区累计降水量达到 200~300 mm(图 3a),400 mm 以上强降水区略偏向于台风中心左侧的括苍山至雁荡山山区,在台风路径右侧的天台山地区也出现降水中心。括苍山站(P1)累计降水量达到 770 mm,日降水量突破建站以来历史极值;雁荡山站(P2)累计降水量达到 503 mm;浙江东部天台山站(P3)累计降水量达到 523.5 mm。

从括苍山自动站、天台山自动站逐小时降水量分析(图 3b),降水历时超过 30 h,长历时、高雨强导致出现极端台风降水。降水基本可分为两个阶段,第一阶段为台风登陆前 9 日 08—23 时,由于台风移动缓慢,外围螺旋雨带影响浙江东部超过 10 h,降

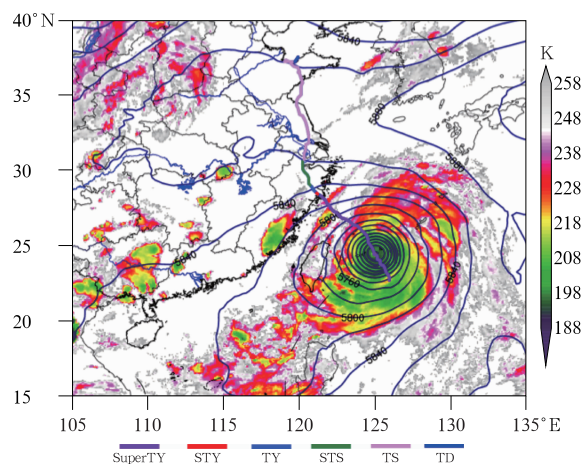


图 1 2019 年 8 月 8 日 20 时 FY-4A
10.8 μm 红外通道辐射亮温(填色),
500 hPa 高度场(等值线,单位: gpm)以及
台风利奇马路径(粗紫线)

Fig. 1 Infrared brightness temperature (colored)
at 10.8 μm channel from FY-4A and geopotential
height at 500 hPa (contour, unit: gpm) at 20:00 BT
8 August 2019 and Lekima's path
(thick purple line)

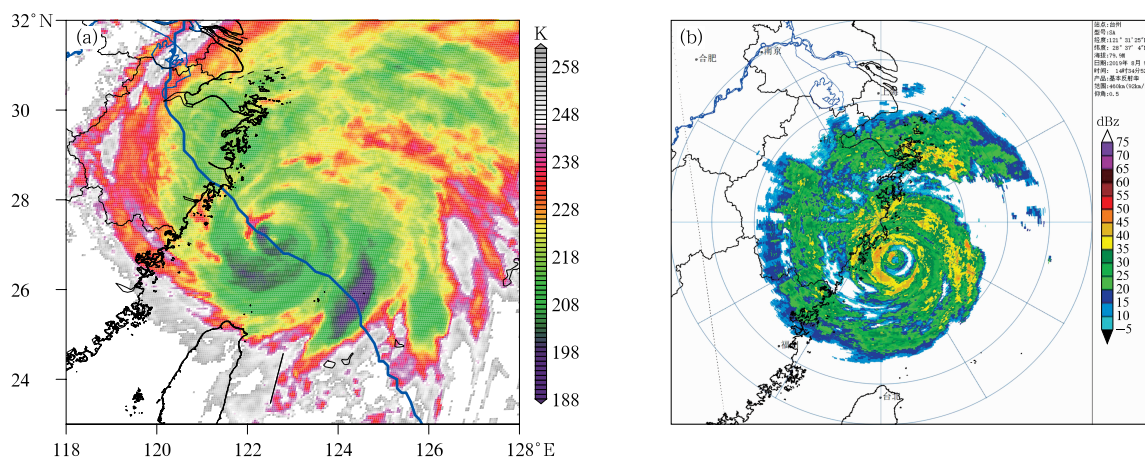


图 2 2019 年 8 月 9 日 (a) 14:34 FY-4A 10.8 μm 红外通道亮温(填色)和“利奇马”路径(蓝线),
(b) 22:34 浙江台山多普勒雷达 0.5° 仰角基本反射率因子

Fig. 2 (a) Infrared brightness temperature (colored) at 10.8 μm channel from FY-4A at 14:34 BT with Lekima's path (blue solid line), and (b) basic reflectivity factor at 0.5° elevation from Taishan Doppler Radar at 22:34 BT 9 August 2019

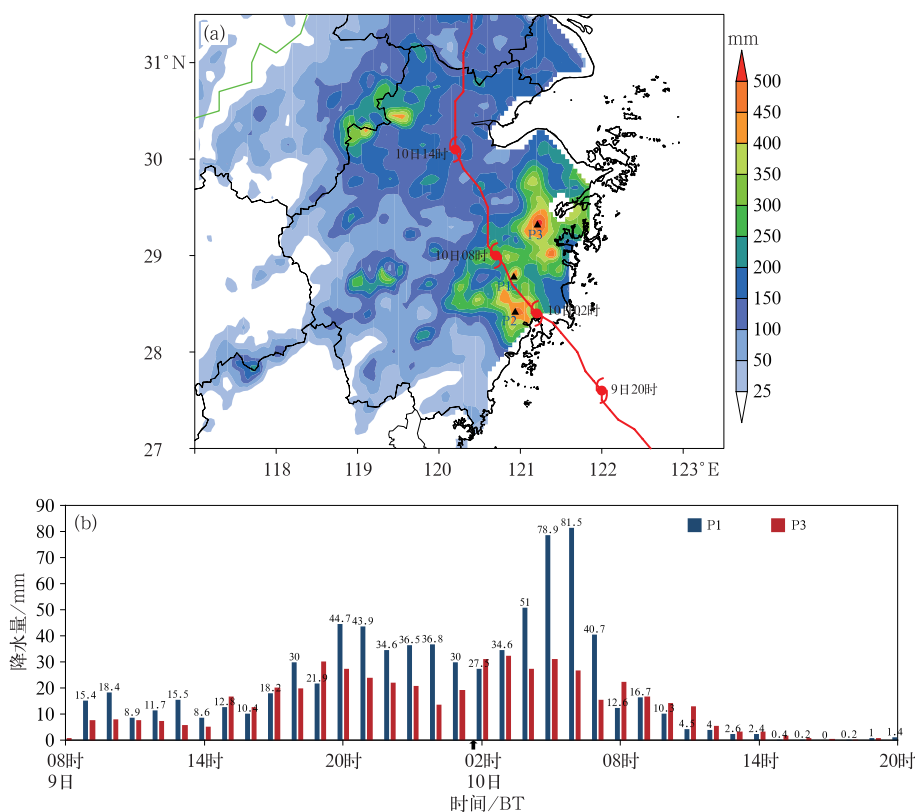


图 3 2019 年 8 月 9 日 08 时至 10 日 20 时 (a) 累计降水量(黑色三角处分别为地面自动站 P1: 括苍山、P2: 雁荡山、P3: 天台山, 红色实线为利奇马台风中心路径), 以及 (b) P1 站、P3 站逐时降水量(箭头处为台风登陆时间 10 日 01:45)

Fig. 3 (a) Accumulated precipitation from 08:00 BT 9 to 20:00 BT 10 August 2019 (black triangles for surface automatic weather stations of P1: Kuocang Mountain, P2: Yandang Mountain and P3: Tiantai Mountain, and red line, Lekima's path), and (b) hourly precipitation of P1 and P3 stations (black arrow pointing to Lekima's landing time at 01:45 BT 10 August)

水强度一般在 $10 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 此阶段累计降水量占 P1 站过程总降水量的 52%。第二阶段主要集中在 9 日深夜至 10 日早上, 受台风眼墙对流和新生螺旋雨带影响, 降水强度变化剧烈, 10 日 05 时括苍山自动站 1 小时降水量达到 81.5 mm, 10 日 03—06 时 3 小时累计降水量达到 211.4 mm。10 日 14 时后台风减弱北上, 浙江东部地区降水显著减弱。

2.2 台风登陆期间对流结构和降水中尺度特征

8 月 9 日早上浙江东部沿海地区开始出现分散性降水, 9 日中午后开始受台风外围螺旋雨带持续影响, 9 日 20 时螺旋雨带 S1 距离台风中心约 200 km (图 4a), 45~50 dBz 强回波中心分布在浙江沿海地区。图 4b 表明浙江东部降水分布不均, 天台山、括苍山和雁荡山都出现降水中心, 其中天台山迎风坡降水强度在 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上, 更为接近台风环流中心的雁荡山地区降水强度达 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 而浙江临海平坦地区降水强度仅为 $5 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。客观分析地面风场表明, 浙江东部处于偏北风与台风外围东北风之间的大尺度辐合区内, 受海陆摩擦差异影响浙江沿海地区也有显著风速辐合, 有利于螺旋雨带降水维持和增强。

8 月 9 日夜间台风中心靠近浙江沿海, S1 螺旋

雨带相对于台风中心向径向外方向扩散、强度减弱 (图 5a), 但天台山地区开始受新生螺旋雨带 S2 影响, 降水强度达 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 5b), 雷达回波具有明显的“列车效应”特征, 在天台山东侧迎风坡形成降水中心。台风眼墙活跃对流区仍然位于台风中心前进方向左侧, 受其影响浙江雁荡山—括苍山地区平均降水强度超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中雁荡山附近自动站最大小时降水量达 98.6 mm; 而在台风中心右侧眼墙区的东南气流中, 降水强度仅为 $5 \sim 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 降水强度差异明显。雁荡山北端与括苍山构成面向大海的开口地形, 在台风环流背景下, 山口处形成了显著低层流场汇合, 有利于地形收口区内侧区域的降水增强。浙江东部地区降水分布与台风螺旋雨带、眼墙对流非对称结构以及浙江东部临海地区地形特征有直接关系。

2.3 台风云物理特征分析

GPM-DPR 雷达 Ku 波段反射率因子分析表明 (图 6a), 登陆前台风内眼墙直径接近 50 km, 回波强度在 30~50 dBz 左右; 外眼墙直径约为 100~120 km, 台风中心左侧部分对流反射率因子超过 50 dBz, 内外眼墙之间存在宽度 10~20 km 左右的弱回波区。台风西侧到西南侧的螺旋雨带距离台风

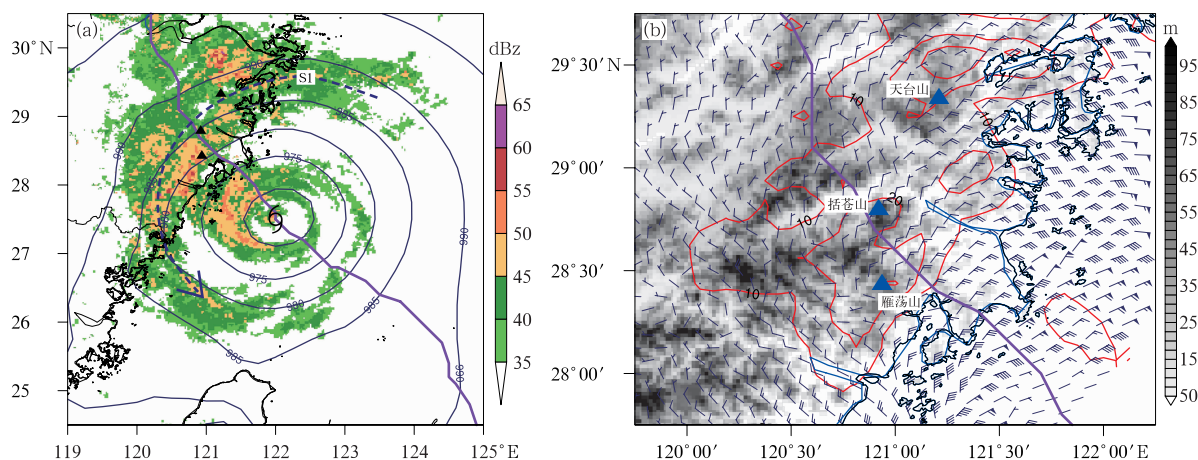


图 4 2019 年 8 月 9 日 20 时 (a) 雷达组合反射率因子 (填色)、海平面气压 (黑线, 单位: hPa) (蓝色虚线 S1 代表螺旋雨带), (b) 地面自动站分析风场、过去 1 小时累计降水量 (红色等值线, 单位: mm) 以及地形海拔高度 (填色) (紫线为台风利奇马路线, 下同)

Fig. 4 (a) Composite reflectivity factor (colored), sea level pressure (black line, unit: hPa) (blue dashed line: spiral rainband S1); (b) surface wind analysis from automatic weather station network, precipitation in past 1 h (red contour, unit: mm) and topography height (colored) at 20:00 BT 9 August 2019 (Purple line means Lekima's path, the same below)

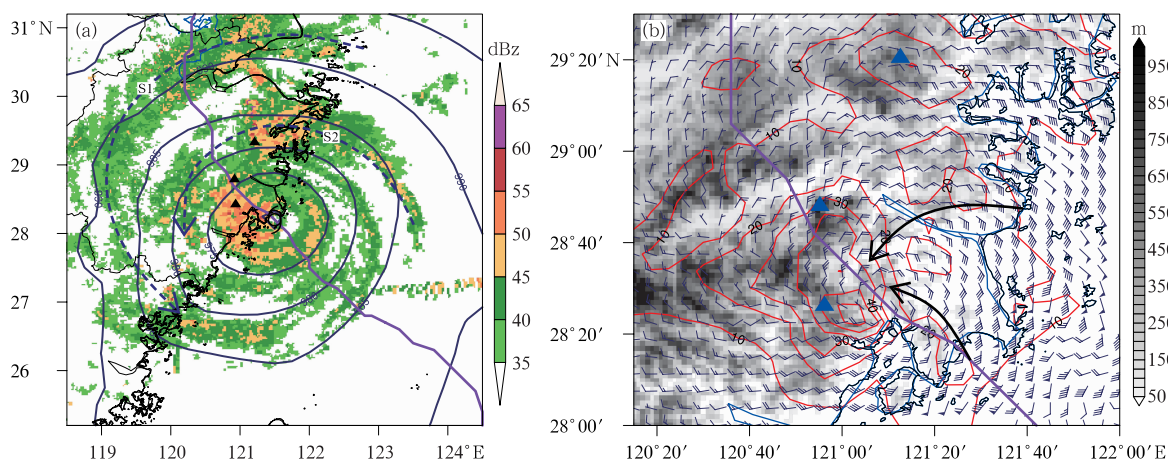


图 5 同图 4, 但为 10 日 03 时

(图 5a 中 S2 虚线代表新生螺旋雨带, 图 5b 中黑色箭头代表山口处汇合流线)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but at 03:00 BT 10 August 2019

(Blue dashed line (S2) means new-born spiral rainband in Fig. 5a, black arrows mean convergent airflow near trumpet-shaped topography in Fig. 5b)

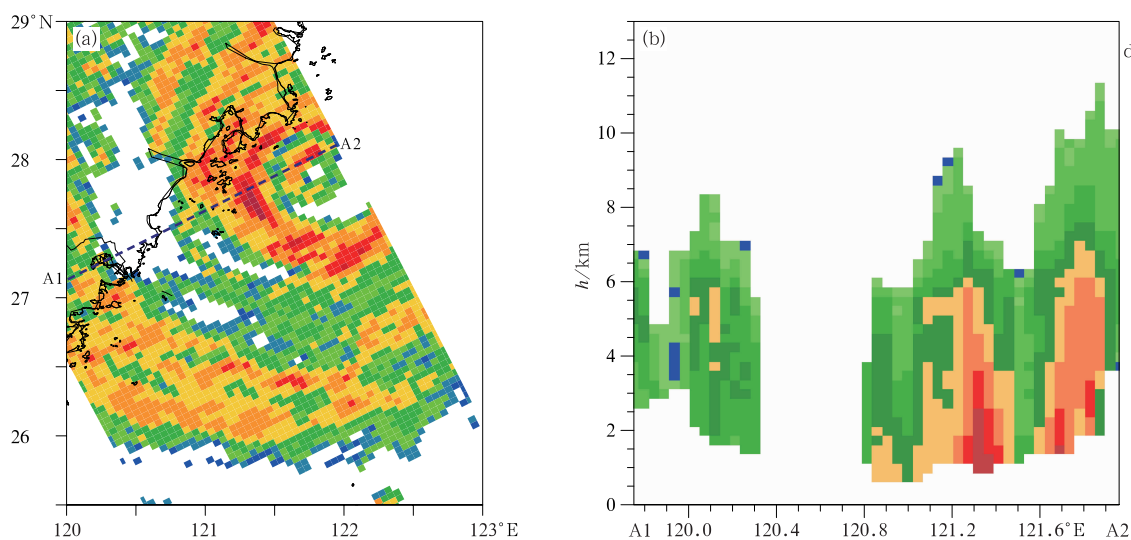


图 6 2019 年 8 月 9 日 21:50(a)GPM-DPR Ku 波段雷达反射率因子,

(b)经过图 6a 中 A1—A2 的反射率因子垂直剖面

Fig. 6 (a) Ku-band reflectivity factor from GPM-DPR, and (b) vertical cross-section of reflectivity factor across A1—A2 in Fig. 6a at 21:50 BT 9 August 2019

外眼墙 80~100 km, 反射率因子在 30~40 dBZ, 结构相对松散。在过台风中心的反射率因子垂直剖面 A1—A2 上(图 6b), 台风内眼墙对流发展高度最高, 内外眼墙区域超过 35 dBZ 的反射率因子处于 6 km 以下的暖云层中, 其中台风外眼墙 2.5 km 以下反射率因子达 50 dBZ, 表明台风强降水与暖云降水机制密切相关。

从 GPM-DPR 遥感反演降水类型分析(图 7a), 台风 S1 和 S2 螺旋雨带以层积混合云降水和热带深

层云降水为主, 在雨带中镶嵌有少量积云性降水; 内外眼墙区域以热带深对流云降水为主。Wu et al (2021)使用 GPM-DPR 遥感反演表明, 台风利奇马内核区云水含量达到 $5.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 明显超出 Han et al(2015)基于卫星被动微波观测对超级台风浣熊总含水量估测, 有利于形成高暖云降水效率。GPM-DPR 降水估测产品表明(图 7b)台风眼墙左侧局部区域降水强度超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 与雁荡山自动站实测较为接近; 而台风外围螺旋雨带降水强

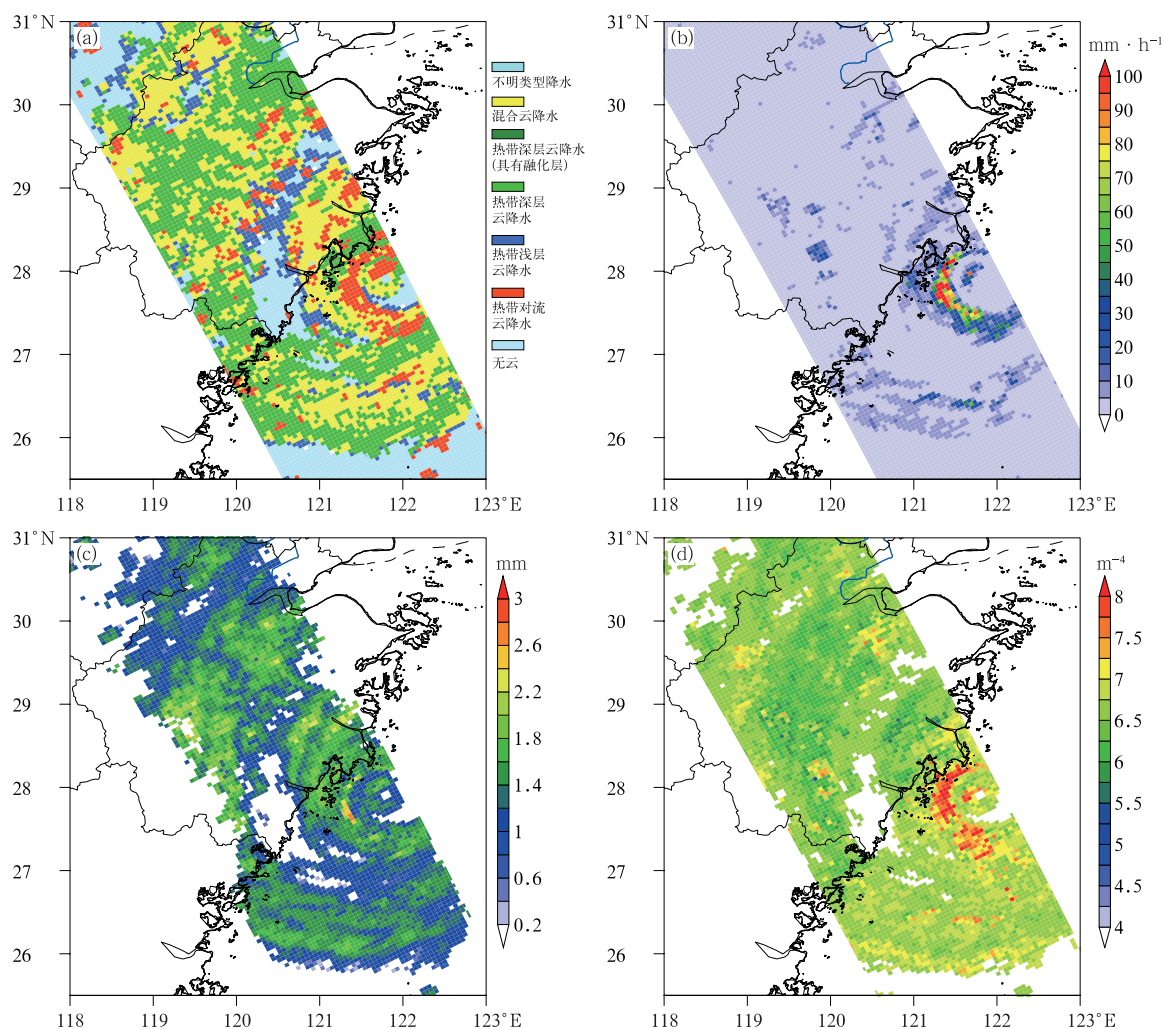


图 7 2019 年 8 月 9 日 21:50 GPM-DPR 反演(a)降水类型,(b)降水强度,
(c)降水粒子有效直径(D_m)和(d)归一化降水粒子数密度($\lg N_w$)

Fig. 7 (a) Precipitation type, (b) precipitation rate, (c) effective raindrop diameter (D_m)
and (d) generalized number concentration ($\lg N_w$) retrieved
from GPM-DPR at 21:50 BT 9 August 2019

度一般为 $5 \sim 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 低于地面自动站观测降水强度, 主要原因是 DPR Ku 波段对大直径降水粒子敏感, 对强降雨反映更好。

GPM-DPR 反演台风云区雨滴有效直径(D_m)平均在 1.5 mm 左右(图 7c), 眼墙对流旺盛区域 D_m 超过 2 mm , 眼墙区域雨滴数浓度(N_w)高出外围雨带 $2 \sim 3$ 个数量级(图 7d)。Chen et al(2012)利用激光雨滴谱仪研究表明, 2009 年第 8 号台风莫拉克的 D_m 集中在 1.5 mm 附近, $\lg N_w$ 集中在 $3 \sim 4.5 \text{ m}^{-4}$; 对比表明台风利奇马的卫星反演 D_m 与台风莫拉克接近, 眼墙区域 $\lg N_w$ 可达到 $6 \sim 8 \text{ m}^{-4}$, 有利于在“利奇马”内核区域出现高降水强度。

3 “利奇马”降水非对称特征成因分析

3.1 台风登陆期间低层环流和锋生特征

台风利奇马在登陆前向北偏西方向移动, 与西太平洋副热带高压之间气压梯度增强, ERA5 诊断表明 9 日 20 时 850 hPa 上台风中心北侧形成大片 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大风速区(图 8a), 近岸偏东风风速超过 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但在近岸摩擦等因素下出现急流带断裂, 浙江东部沿海地区位于东风风速核出口位置, 水平辐合造成的强迫抬升运动有利于 S1 螺旋

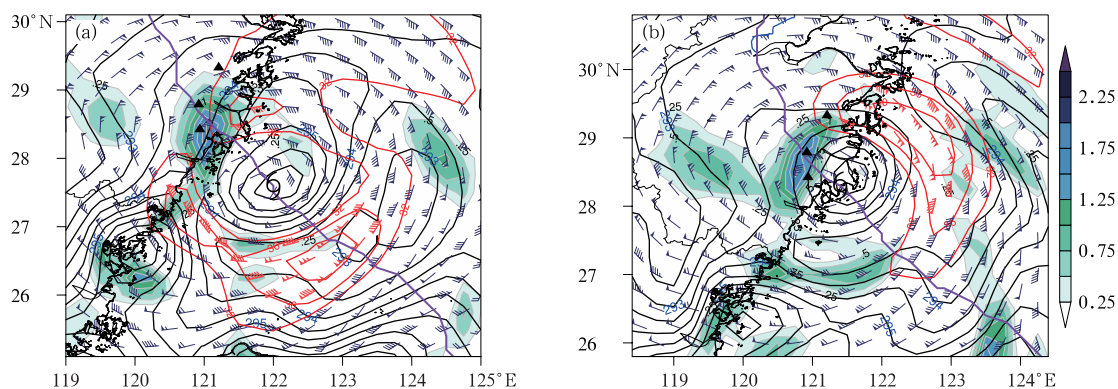


图 8 2019 年 8 月 (a) 9 日 20 时和 (b) 10 日 02 时 850 hPa 风场和 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上风速 (红线)、位温 (黑线, 单位: K) 和锋生函数 [填色, 单位: $\text{K} \cdot (100 \text{ km})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$]

Fig. 8 Wind barb and wind speed $> 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (red line) at 850 hPa, geopotential temperature (black line, unit: K), and frontogenesis function [colored, unit: $\text{K} \cdot (100 \text{ km})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$] at 850 hPa at (a) 20:00 BT 9 and (b) 02:00 BT 10 August 2019

雨带降水发展。浙江东部处于台风暖湿气团以及陆地干冷气团之间的过渡地区, 计算表明该地区低层锋生强度为 $1.5 \sim 2.0 \text{ K} \cdot (100 \text{ km})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中辐合项 FG1 对总锋生贡献为 87%, 台风大风速出口区形成的辐合对锋生作用最为明显。

台风登陆期间 10 日凌晨, 台风中心前进方向右侧 850 hPa 大风速核超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8b), 风速轴与浙江中部海岸线几乎正交, 天台山地区恰好位于台风大风速核出口的强辐合区, 有利于垂直上升运动发展。浙江东部仍然维持锋生, 锋生强度变化

不大, 其中变形项 FG2 对总锋生贡献为 69%, 表明此时台风流场与等温线配置形成的拉伸变形机制对于锋生贡献较为明显。在环境场风速辐合以及持续锋生强迫下, 有利于台风螺旋雨带降水维持和增强, 对于台风登陆前浙江东部的持续性降水具有较好的指示意义。

3.2 环境垂直切变和垂直环流非对称特征

台风登陆前 9 日 20 时 (图 9a), 环境垂直切变 (VWS) 为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 指向台风前进方向略偏左方

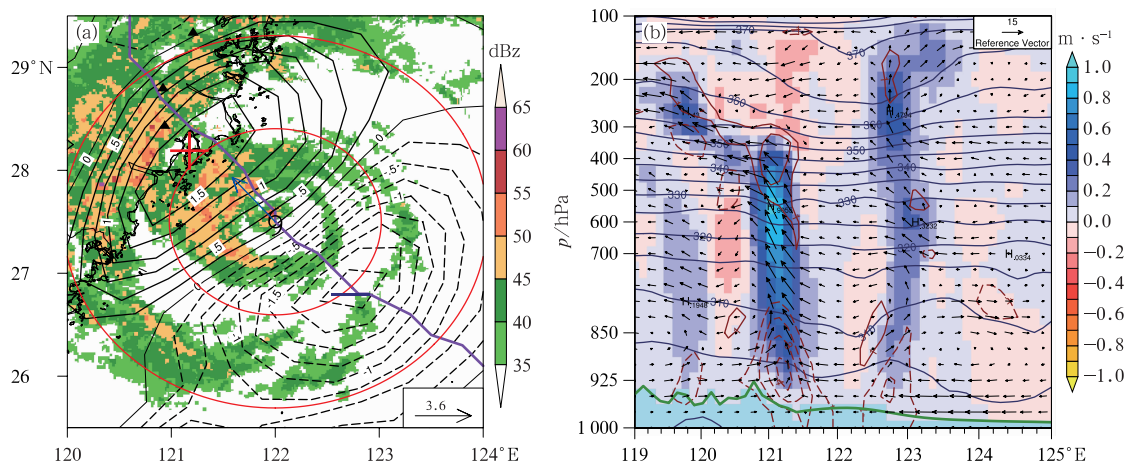


图 9 ERA5 诊断 2019 年 8 月 9 日 20 时 (a) 垂直差分涡度平流 (等值线, 单位: 10^{-8} s^{-2}) 和正负平流中心, 以及组合反射率因子 (填色) (蓝色箭头为环境垂直切变, 红色内圆半径为 100 km, 外圆半径为 200 km); (b) 经台风中心 VWS 方向垂直速度剖面 (填色)、水平散度 (红线, 单位: 10^{-4} s^{-1}) 和位温 (蓝线, 单位: K) (风矢量为水平风 v 和垂直速度 w 合成, w 放大 10 倍)

Fig. 9 (a) Vertical differential vorticity advection with positive and negative signs at local centers (contour, unit: 10^{-8} s^{-2}), composite reflectivity factor (colored) (blue vector for environmental VWS from ERA5 reanalysis; red inner circle radius: 100 km, red outer circle radius: 200 km); (b) vertical velocity profile (colored), horizontal divergence (red line, unit: 10^{-4} s^{-1}), geopotential temperature (blue lines, unit: K) at 20:00 BT 9 August 2019 (vectors composed by horizontal and vertical velocity amplified by 10 times on the vertical cross-section along direction of VWS through typhoon's center)

位,垂直差分涡度平流呈偶极子分布,在 VWS 下游方向为正中心,上游方向为负中心,理论上有利于台风内核区对流集中在 VWS 指向的左前象限。9 日 20 时至 10 日 04 时台风登陆期间,VWS 为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并按逆时针方向小幅偏转,仍然有利于在台风内核区的左前象限出现最强对流,垂直差分涡度平流对于台风内核对流的非对称分布有较好指示意义。

基于典型热带气旋定量降水估测关系 $Z = 250R^{1.2}$ (Fulton et al, 1998),图 9a 上 VWS 指向偏左侧区域的组合反射率因子大致为 45 dBz,右侧约为 40 dBz,对应降水率分别为 $56 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $22 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,表明在没有受近海地形抬升、海陆差异等因素影响下,台风利奇马眼墙对流的非对称分布

就能够在登陆点附近造成约 1 倍的降水强度差异。在沿着 VWS 方向的垂直剖面上(图 9b),VWS 下游方向具有更明显的低层辐合、高层辐散,上升运动中心位于 $600 \sim 500 \text{ hPa}$,最大上升速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,约为 VWS 上游地区的上升运动 1 倍,与雷达观测体现的对流非对称特征基本一致。

3.3 浙江沿海地形对降水影响分析

综上所述,浙江东部强降水分布受台风螺旋雨带和眼墙的中尺度对流结构、近海中小尺度地形以及台风云物理特征等因素综合影响。台风登陆期间地面自动站分钟级降水量统计表明(图 10a),超过 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上降水强度的高频次站点集中在括苍山—雁荡山构成的喇叭口地形内侧区域。对比

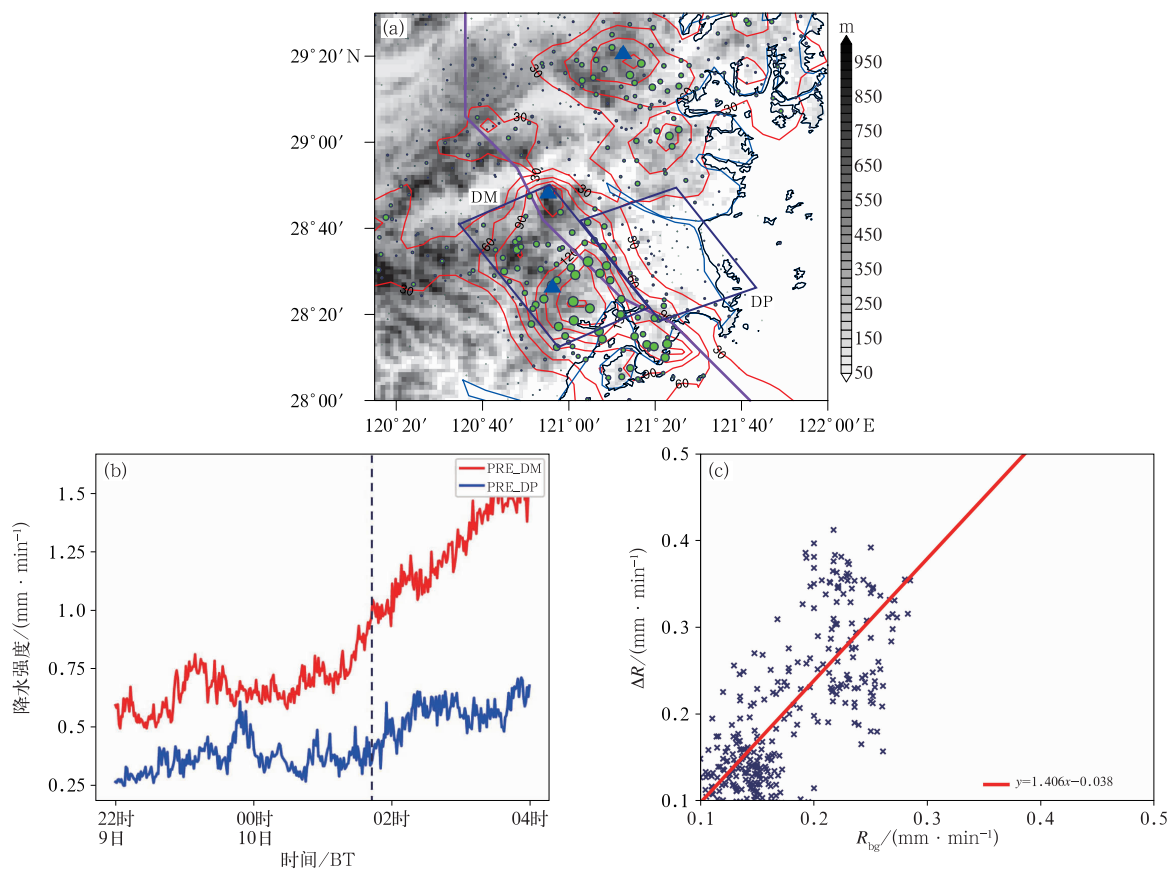


图 10 2019 年 9 日 22 时至 10 日 04 时(a)降水强度超过 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 站点频次分析等值线(红线,圆点半径代表该站频次)和地形海拔高度(填色)(DM 方框:山区,DP:平原区),

(b)DM 和 DP 区域平均降水强度时间变化(虚线:台风登陆时间),

(c)DM-DP 降水强度差异 ΔR 与台风背景降水强度 R_{bg} 散点分布和线性回归直线(红线)

Fig. 10 (a) Frequency analysis of precipitation rate $> 0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (red line, radius of circles: frequency at stations), and topography height (colored) (DM: mountain domain box, DP: plain domain box), (b) area-averaged precipitation rate (blue dashed line: typhoon's landing time), and (c) scatter plot of precipitation rate difference (ΔR) and background precipitation rate (R_{bg}) linear regression (red line) from 22:00 BT 9 to 04:00 BT 10 August 2019

括苍山—雁荡山山区(DM)和临海平原地区(DP)降水强度(图 10b),在台风登陆前 S1 螺旋雨带影响期间,山区降水强度 2 倍于平原区;而在台风内核对流影响期间,山区、平原区降水强度都在增长,但山区降水强度增长速度更快,10 日 04 时山区平均降水强度达到 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,接近 3 倍于平原地区。假定平原地区降水强度作为台风背景降水强度 R_{bg} ,线性相关分析表明“利奇马”登陆期间 DM 与 DP 降水强度差异 $\Delta R \approx 1.4R_{bg}$ (图 10c),这一降水增幅关系受到地形和台风眼墙对流非对称结构的共同影响。

Yu and Cheng(2013)考虑台风背景下地形抬升以及云物理机制影响,将地形降水增幅 ΔR_m 估计为:

$$\Delta R_m = \frac{3R_{bg} M_f}{2\rho_w D} \times H$$

ERA5 再分析数据中 DM 和 DP 区域内大气液态水(云水+雨水)含水量 $M_f \approx 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,水密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,雨滴半径 $D \approx 1 \text{ mm}$,DM 地形区平均高度 500 m,则 $\Delta R_m = 0.75R_{bg}$,这表明在均匀台风环流背景假设下,DM 山区降水强度可较平原区高出 75%;由于 $\frac{\Delta R_m}{\Delta R} = \frac{0.75R_{bg}}{1.4R_{bg}} = 0.54$,因此地形性降水增幅解释了约 50%总降水强度差异,其余 50%主要与台风利奇马非对称对流结构等因素相关。

以上分析表明,台风利奇马在浙江东部的地形性降水增幅效应与台风对流非对称结构对降水的影响基本相当,并且地形降水增幅效应、台风对流非对称结构都对台风中心前进方向的左前侧降水有增强效应,有利于在台风中心左前侧的括苍山—雁荡山山区造成极端降水。需要指出,上述诊断计算受多项物理参数不确定性影响,特别是台风背景降水强度 R_{bg} 估计缺少直接观测,后继需要更多的台风降水个例统计分析,并借助数值模拟试验做进一步研究。

4 结论与讨论

本文基于多源资料揭示了台风利奇马登陆期间的螺旋雨带、眼墙对流的中尺度结构以及台风云物理特征;初步总结了台风登陆过程中不同阶段强降水基本特征和成因;基于近海山区和平原区降水强

度观测对比,结合台风背景地形降水增幅理论模型,分析了浙江东部近海地区中小尺度地形对台风利奇马降水的影响。

(1)受“利奇马”影响浙江东部降水持续时间长达 30 h,8 月 9 日白天受台风外围 S1 螺旋雨带长时间影响,降水强度一般在 $10 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;9 日夜间强降水与台风新生螺旋雨带 S2 和眼墙对流相关,降水强度可接近 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;降水中心分布与台风中尺度螺旋雨带、眼墙对流的中小尺度特征以及浙江东部天台山、括苍山和雁荡山等地形特征相关。

(2)GPM 卫星反演产品表明台风螺旋雨带以层积混合型降水为主,台风眼墙区以热带暖云对流性降水为主,眼墙区域的雨滴有效直径更大、雨滴密度更高,有利于产生高暖云降水效率;卫星反演眼墙对流左侧区域降水强度超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,与实况降水强度观测接近。

(3)台风利奇马在向华东近海地区靠近时,浙江东部地区持续受台风外围大风速出口区辐合以及低层锋生影响,有利于外围螺旋雨带的维持和发展;登陆前后环境垂直切变主要指向台风前进方向偏左侧,有利于在垂直切变下游方向上形成更活跃的对流,导致登陆点附近强降水区整体偏向于台风中心左侧;台风路径右侧天台山地区强降水与新生螺旋雨带造成的列车效应相关。

(4)地面自动站分钟级降水观测表明,“利奇马”登陆期间浙江近海山区降水强度 2~3 倍于近海平原地区,理论诊断证明地形降水增幅效应可解释约 50%的山区/平原区降水强度差异;地形降水增幅、眼墙对流非对称性分布都对台风中心前进方向的左前侧降水有增强效应,有利于在台风中心左前侧的括苍山—雁荡山山区造成极端降水。

本文应用多源资料讨论了台风利奇马登陆前后的对流结构、降水特征和基本成因,但对于台风螺旋雨带和内核对流的中小尺度结构需要更为深入的分析,关于环境垂直切变、地形特征对降水影响需要更多的台风降水个例分析,通过高分辨率数值模式预报试验做进一步的验证。

参考文献

- 陈联寿,罗哲贤,李英,2004. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报,62(5):541-549. Chen L S, Luo Z X, Li Y, 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):541-549(in Chinese).
- 费建芳,刘磊,黄小刚,等,2013. 热带气旋眼墙非对称结构的研究综

- 述[J]. 气象学报, 71(5): 987-995. Fei J F, Liu L, Huang X G, et al, 2013. Review of the studies of the asymmetric structure of the eyewall of a tropical cyclone[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 987-995(in Chinese).
- 高拴柱, 2020. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象, 46(6): 792-800. Gao S Z, 2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 46(6): 792-800(in Chinese).
- 林良勋, 梁巧倩, 黄忠, 2006. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J]. 气象, 32(2): 14-18. Lin L X, Liang Q Q, Huang Z, 2006. Analysis of circulation pattern of rapidly intensified off-shore tropical cyclones of South China [J]. Meteor Mon, 32(2): 14-18(in Chinese).
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿, 1998. 台湾岛地形诱发次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制[J]. 大气科学, 22(2): 156-168. Meng Z Y, Xu X D, Chen L S, 1998. Mechanism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan Island topography on tropical cyclone unusual motion[J]. Sci Atmos Sin, 22(2): 156-168(in Chinese).
- 王海平, 董林, 许映龙, 等, 2021. 2019 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(8): 1009-1020. Wang H P, Dong L, Xu Y L, et al, 2021. Analysis on the characteristics of typhoon activity and forecasting difficulties in Western North Pacific in 2019[J]. Meteor Mon, 47(8): 1009-1020(in Chinese).
- 许映龙, 韩桂荣, 麻素红, 等, 2011. 1109 号超强台风“梅花”预报误差分析及思考[J]. 气象, 37(10): 1196-1205. Xu Y L, Han G R, Ma S H, et al, 2011. The analysis and discussion on operational forecast errors of Super Typhoon Muifa (1109) [J]. Meteor Mon, 37(10): 1196-1205(in Chinese).
- 杨舒楠, 曹勇, 陈涛, 等, 2019. 台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J]. 气象, 45(1): 38-49. Yang S N, Cao Y, Chen T, et al, 2019. Causes and focus points of forecasting the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on day 2 after landing[J]. Meteor Mon, 45(1): 38-49(in Chinese).
- Chen B J, Wang Y, Ming J, 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in Typhoon Morakot (2009) [J]. J Trop Meteor, 18(2): 162-171.
- Chen S S, Knaff J A, Marks F D, 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM[J]. Mon Wea Rev, 134(11): 3190-3208.
- Frank W M, Ritchie E A, 2001. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes[J]. Mon Wea Rev, 129(9): 2249-2269.
- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al, 1998. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Wea Forecasting, 13(2): 377-395.
- Han Y, Zou X L, Weng F Z, 2015. Cloud and precipitation features of Super Typhoon Neoguri revealed from dual oxygen absorption band sounding instruments on board FengYun-3C satellite[J]. Geophys Res Lett, 42(3): 916-924.
- Hence D A, Houze R A, 2011. Vertical structure of hurricane eyewalls as seen by the TRMM precipitation radar[J]. J Atmos Sci, 68(8): 1637-1652.
- Jones S C, 1995. The evolution of vortices in vertical shear. I: initially barotropic vortices[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 121(524): 821-851.
- Liu Y B, Zhang D L, Yau M K, 1999. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: kinematics and inner-core structures[J]. Mon Wea Rev, 127(11): 2597-2616.
- Shu S J, Xu Y, Song J J, et al, 2012. An observational study on distribution of precipitation associated with landfalling tropical cyclones affecting China[J]. J Trop Meteor, 18(3): 275-283.
- Wu Z H, Huang Y B, Zhang Y, et al, 2021. Precipitation characteristics of Typhoon Lekima (2019) at landfall revealed by joint observations from GPM satellite and S-band radar[J]. Atmos Res, 260: 105714.
- Yang S, Gao S T, Lu C G, 2014. A generalized frontogenesis function and its application[J]. Adv Atmos Sci, 31(5): 1065-1078.
- Yu C K, Cheng L W, 2013. Distribution and mechanisms of orographic precipitation associated with Typhoon Morakot (2009) [J]. J Atmos Sci, 70(9): 2894-2915.
- Yu Z F, Wang Y Q, Xu H M, 2015. Observed rainfall asymmetry in tropical cyclones making landfall over China[J]. J Appl Meteor Climatol, 54(1): 117-136.
- Zhang A Q, Fu Y F, 2018. Life cycle effects on the vertical structure of precipitation in East China measured by Himawari-8 and GPM DPR[J]. Mon Wea Rev, 146(7): 2183-2199.
- Zhang D L, Liu Y B, Yau M K, 2000. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part III: dynamically induced vertical motion[J]. Mon Wea Rev, 128(11): 3772-3788.
- Zhang D L, Kieu C Q, 2005. Shear-forced vertical circulations in tropical cyclones[J]. Geophys Res Lett, 32(13): L13822.