



两次登闽台风后部相似LMCS雨带降水差异对比分析

林小红 蒋滔 范能柱 郑秀丽

Comparative analysis of precipitation differences in the similar LMCS rainbands at the rear of two typhoons landing in Fujian

LIN Xiaohong, JIANG Tao, FAN Nengzhu, ZHENG Xiuli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-031>

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

2013年相似路径台风“苏力”与“潭美”造成福建暴雨落区差异的成因

Causality analysis of difference of heavy rainfall distribution in Fujian caused by typhoons Soulik and Trami along similar tracks in 2013

暴雨灾害. 2021, 40(2): 136–146 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.004>

两个相似路径台风深入内陆所致暴雨对比分析

Comparative analysis of rainstorms caused by two typhoons with similar path deep inland

暴雨灾害. 2021, 40(5): 484–493 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.005>

变性台风“美莎克”结构演变特征及暴雨成因分析

Structural evolution characteristics and cause analysis of heavy rain of transition typhoon "Maysak"

暴雨灾害. 2023, 42(5): 521–531 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-050>

华南沿海两个强降水雨团的动力和微物理结构模拟分析

Modeling and analysis of the dynamical and microphysical structures of two cellular rainstorms in South China coasts

暴雨灾害. 2025, 44(5): 576–591 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-034>

三种云微物理参数化方案对台风期间放射性物质扩散模拟的影响

The impact of cloud microphysical parameterization schemes on the diffusion of radioactive material during typhoon conditions

暴雨灾害. 2025, 44(6): 847–857 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-205>

4次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征对比分析

Comparison analysis of raindrop spectrum characteristics of four typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai

暴雨灾害. 2025, 44(5): 621–631 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-170>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

林小红,蒋滔,范能柱,等.2026.两次登闽台风后部相似 LMCS 雨带降水差异对比分析[J].暴雨灾害,45(5):644–653. LIN Xiaohong, JIANG Tao, FAN Nengzhu, et al. 2026. Comparative analysis of precipitation differences in the similar LMCS rainbands at the rear of two typhoons landing in Fujian [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(5):644–653 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–031

两次登闽台风后部相似 LMCS 雨带降水差异对比分析

林小红¹,蒋滔¹,范能柱¹,郑秀丽²

(1. 福建省气象台,福州 350007; 2. 福州市气象台,福州 350006)

摘 要: 2023 年第 5 号台风“杜苏芮”和 2024 年第 3 号台风“格美”在福建省登陆后深入赣北,其后部均在福建沿海地区形成线状中尺度对流系统 (Linear Mesoscale Convective Systems, LMCS), 2 次 LMCS 雨带形态极其相似但产生的降水强度差异大。基于气象观测站、三维闪电、S 波段、双偏振和风廓线雷达以及 ERA5 再分析等数据,利用统计及诊断方法对这 2 次相似雨带上的降水强度、雨带组织形式、闪电活动、降水云微物理结构及环流形势和环境条件等差异进行对比分析,结果表明: (1) 2 次 LMCS 过程均具有累积雨量大、持续时间长、夜雨明显、雨强极值强、强降水回波后向传播及降水“列车效应”等特征,但台风“杜苏芮”降水更显著。 (2) “杜苏芮” LMCS-1 雨带强降雨上空云闪活跃,强雷暴特征显著;“格美” LMCS-2 闪电稀少,表现弱雷暴特征。 (3) 云微物理垂直结构特征显示,“杜苏芮”强降雨上空的强回波主体对流质心高于 0 °C 层,双偏振 HCL 产品显示 0 °C 层上下以固液混合粒子共同主导,为非暖云聚合碰并增长过程,该特征与大陆对流降水相似;“格美”强降雨上空的强回波主体对流质心低于 0 °C 层,以液相雨滴粒子为主导,为暖云微物理增长过程,与热带海洋对流降水特征相符。 (4) “杜苏芮” LMCS-1 过程降水明显强于“格美” LMCS-2 的主要原因在于其大气垂直运动表现更强且持续时间更长,前者粒子浓度明显高于后者,导致雨强显著。过程双偏振参量 $Z_H \geq 52$ dBz、 $Z_{DR} > 2.5$ dB、 $K_{DP} > 1.6$ (°)·km⁻¹ 且持续时间长达 30 min 以上,可作为 100 mm·h⁻¹ 雨强预报的参考量。

关键词: 杜苏芮; 格美; 线状中尺度对流系统; 雨强; 云微物理结构

中图法分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–031

Comparative analysis of precipitation differences in the similar LMCS rainbands at the rear of two typhoons landing in Fujian

LIN Xiaohong¹, JIANG Tao¹, FAN Nengzhu¹, ZHENG Xiuli²

(1. *Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350007*; 2. *Fuzhou Meteorological Observatory, Fuzhou 350006*)

Abstract: Typhoon Doksuri (2305) and Gaemi (2403) penetrated northern Jiangxi after landing in Fujian, with their trailing edges forming linear mesoscale convective systems (LMCS) along the Fujian coast. Although the two LMCS rainband shapes were extremely similar, their resulting precipitation intensities differed significantly. Basing on the meteorology stations data, three-dimensional lightning data, S-band, dual-polarization and wind profiler radar data, and ERA5 reanalysis data, the differences in precipitation intensity, rainband organization patterns, lightning activity, microphysical structures of precipitating clouds and situation background and environmental conditions on the two similar rainbands were comparative analyzed using statistical and diagnostic methods in this paper. The results are as follows. (1) Both LMCS cases are characterized by large accumulated precipitation, long duration, obvious heavy rainfall occurring nighttime, rainfall intensity extreme high, backward propagation of rainfall echoes and precipitation train effects. But heavy rainfall in LMCS of Typhoon Doksuri is more significant. (2) Over the strong rainfall intensity of the LMCS-1 rainbands, Typhoon Doksuri exhibites active cloud flashes with pronounced characteristics of severe thunderstorms, while Typhoon Gaemi LMCS-2 show sparse cloud flashes activity and displays features of weak thunderstorms. (3) The vertical structure characteristics of cloud microphysics show: In the heavy rainfall upper air of Typhoon Doksuri, the strong convective core of strong echo is above the 0 °C level. The dual-polarization HCL product shows that the solid-liquid mixture particles are the main dominant factor above and below the 0 °C level, which is a non-warm

收稿日期: 2025–02–21; 定稿日期: 2025–07–12

资助项目: 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2025-061); 福建省科技厅面上项目 (2024J011144); 南京气象科技创新研究院北极阁开放研究基金项目 (BJG202401); 山东省自然科学基金项目 (ZR2022QD089)。

第一作者: 林小红, 主要从事台风、暴雨天气预报技术研究。E-mail: pop_lxh@163.com

通信作者: 蒋滔, 主要从事强对流天气预报技术研究。E-mail: 184163842@qq.com

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

cloud aggregation collision and growth process, and characteristic is similar to the continental convective precipitation. For Typhoon Gaemi, the strong convective core of strong echo is below the 0 °C level, and liquid rain droplet particles are the main dominant factor, which is a warm cloud microphysical growth process, and this characteristic is consistent with the of tropical oceanic convective precipitation. (4) The key factor for the difference in the accumulated precipitation lies in the fact that the atmospheric vertical motion of Typhoon Doksuri LMCS-1 case is stronger and lasts longer than Typhoon Gaemi LMCS-2. Former has a significantly higher concentration of particles than latter, resulting in a significant increase in rainfall intensity. The dual-polarization parameters $Z_H \geq 52$ dBz, $Z_{DR} > 2.5$ dB, $K_{DP} > 1.6$ (°)·km⁻¹ and a duration of more than 30 min can be used as a reference for 100 mm·h⁻¹ rainfall intensity forecasts.

Key words: Doksuri; Gaemi; linear mesoscale convective systems; rainfall intensity; cloud microphysical structure

引言

线状中尺度对流系统 (Linear Mesoscale Convective Systems, LMCS) 是造成强降水的重要影响系统, 具有组织性强、生命期长等特点, 可能造成严重的后果, 因此其发生发展机理及预报指标是当前国内外研究的热点之一 (俞小鼎, 2011; Meng et al., 2012; 陈涛等, 2024)。

国内外对 LMCS 造成强降水的研究主要从大气环流、环境条件等宏观角度进行分析 (Chen et al., 2017; 姬雪帅等, 2023), 然而降水与大气微观的过程也密不可分, 微观过程决定着云带内的降水效率, 因此云微物理过程对强降水作用的研究已越来越受到重视 (Bao et al., 2022; 崔梦雪等, 2024)。研究表明, 不同相态的粒子及有冰相粒子参与的冷雨过程会产生明显的降水强度差异 (Wang et al., 2018; Zhao et al., 2022; 杨秀庄等, 2025)。针对这种差异, 近年来, 先进的新型地基三维闪电资料被广泛应用。闪电活动是强对流云系生消过程中重要的物理现象, 能够提供对流雨带内动力和微物理过程的相关信息 (林小红等, 2025)。我国登陆台风的闪电密度最大值出现在雨带南侧 500~600 km 径向范围处及低亮温和高反射率的深对流区 (王艳等, 2011; 王芳等, 2017; Zhang et al., 2020)。当雨带具有强烈对流不稳定时, 0 °C 层以上液态水、霰和冰粒子同时出现, 易产生闪电活动 (Reinhart et al., 2014; 林小红等, 2025)。闪电频次的增加能够预示霰或冰雹粒子体积的增加以及上升气流的增强, 可表征雨带对流的发展 (杨美荣等, 2011; Reinhart et al., 2014; 徐良韬等, 2016; Liu et al., 2020; Qie et al., 2021)。

双偏振雷达反演的粒子相态分类 (Hydrometeor Classification, HCl) 产品可以帮助识别降水中的水滴、冰晶和其他颗粒 (林小红等, 2025), 从而更好地理解降水的形成过程和强度; 参数差分相移率 (K_{DP}) 和差分反射率 (Z_{DR}) 大值区说明雨滴不仅水平直径大且数浓度高, 对应雨强大 (汪舵等, 2017; 唐明晖等, 2024; 施娟等, 2025)。针对台风内外雨带的粒

子相态分布及作用分析, 研究指出融化层以上的冰云过程主导了降水大粒子的产生, 而暖云过程往往提供充足的雨滴浓度, 上述情况下能够产生高效率降水 (Wang et al., 2018; Bao et al., 2020, 2022; 崔梦雪等, 2023; Wang et al., 2025)。上述可知, 国内外基于闪电数据、双偏振雷达参量对台风降水云微物理特征的研究已取得一些成果, 但将两种数据联合研究的成果较少。当前三维闪电与新一代双偏振雷达资料已不断丰富, 但应用价值仍处在探索阶段。

2023—2024 年登陆台风“杜苏芮” (2305) 和“格美” (2403) 后部分别形成的 LMCS 均给福建沿海地区带来了暴雨天气, 2 次 LMCS 雨带形态相似, 影响时长相当, 但前者产生的过程降水量是后者的 2.1 倍, 且出现短时强降水的站数更多及雨强更大, 降水显著。此外, “杜苏芮” LMCS 上还伴有大范围密集闪电活动, 而“格美”闪电稀少。鉴于上述差别, 本文利用福建省气象观测站、三维闪电、结合 S 波段、双偏振和风廓线雷达及 ERA5 再分析数据, 针对这 2 次相似 LMCS 雨带上的降水强度、雨带组织形式、闪电活动、降水云微物理结构及环流形势和环境条件等差异进行诊断与对比分析, 以期为提高台风中小尺度暴雨预报准确率提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据说明

本文使用的数据包括: (1) 福建省国家气象观测站和区域气象观测站的分钟级降水数据, 用于统计分析 LMCS 过程降水量和雨强。(2) 中国气象局上海台风所提供的台风最佳路径数据 (<https://tcdata.typhoon.org.cn>), 包含台风中心位置、中心最低气压及中心附近最大风速等, 台风生命期内时间分辨率为 6 h。(3) 闪电数据来自中国科学院电工研究所研制的 VLF/LF 三维闪电定位监测系统, 探测范围覆盖福建省及周边地区和台湾海峡, 该系统能对全闪 (云闪和地闪) 进行三维定位, 用于格点化分析闪电频次和雨强的关系。(4) 组合反射率因子 (Z_H) 来自福建

省 8 部 S 波段天气雷达, 扫描半径为 230 km, 数据间隔为 6 min, 最低仰角为 0.5° , 最高仰角为 19.5° , 空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 用于分析 LMCS 雨带生消演变特征。(4) 双偏振参量由福建沿海地区的福州、泉州和厦门 3 部双偏振雷达组网获得, 双偏振参数包括差分反射率因子 (Z_{DR}) 和差分传播相移 (K_{DP}), 主要用于降水云微物理垂直结构分析。(5) 粒子相态分类 HCl 产品基于中国气象科学研究院开发的粒子相态识别软件获得, 该产品采用 Park 等 (2009) 提出的 HCl 粒子相态分类算法, 利用模糊逻辑法对水成物进行相态识别, 将雷达回波识别为“小雨、大雨、冰雹、大雨滴、生物、地物、干雪、湿雪、冰晶、霰”共 10 类, 主要对粒子相态分析。(6) 风廓线雷达资料来自福建省晋江站 (118.54°E , 24.81°N) 和秀屿站 (119.11°E , 25.28°N), 时间分辨率为 6 min, 探测地面到 10 km 环境大气的风向、风速及垂直速度。(7) 来自欧洲中期天气预报中心第五代全球气候大气再分析资料 (ERA5), 数据垂直方向从 1 000 hPa 至 100 hPa 共 23 层, 水平分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率 1 h。该资料结合风廓线资料用于强降水形成的环境条件分析。

1.2 研究方法

本文在俞小鼎 (2011) 对 LMCS 的定义 (雷达组合反射率 ≥ 35 dBz 的回波长宽比要超过 5:1, 且长度至少 50 km) 基础上, 将福建组网雷达回波图像上表现为一条形态连续、具有明显长轴 (长度至少 100 km), 组合反射率 ≥ 35 dBz 的回波长宽比大于 5:1, 且持续时长 2 h 以上, 定义为一次 LMCS 影响过程。此外, 本文将 LMCS 过程满足至少 5 站雨强 (指整点小时降水量) ≥ 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 或至少 3 站雨强 ≥ 50 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 或至少 1 站雨强 ≥ 80 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 定义为一次 LMCS 降水

过程。通过以上定义确定台风“杜苏芮”后部 LMCS (定义为 LMCS-1) 降水过程时段为 2023 年 7 月 29 日 00:00 (北京时, 下同)—29 日 10:00 (历时 10 h); 台风“格美”后部 LMCS (定义为 LMCS-2) 经历 2 次降水过程时段, 分别为 2024 年 7 月 26 日 21:00—27 日 00:00 (LMCS-2a, 历时 3 h) 和 7 月 27 日 00:00—11:00 (LMCS-2b, 历时 11 h)。

2 LMCS 降水强度对比

台风“杜苏芮”于 2023 年 7 月 28 日 21:00 移入江西省后强度减弱至热带低压 (图 1a), 期间其东南侧组织发展出一条南北向并持续 10 h 的 LMCS-1, 致福建沿海地区出现大暴雨 (图 1b 蓝色椭圆圈内), 过程累计降水量极值为 431.7 mm, 雨强极值达 103.6 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

台风“格美”于 2024 年 7 月 26 日 17:00 前后移入江西省后强度维持热带风暴级, 其向北移动期间 (图 1a), 同样在其东南侧先后发展出两条南北向的 LMCS-2a 和 LMCS-2b, 致福建沿海地区出现暴雨到大暴雨。LMCS-2a 历时 3 h 产生的过程累计降水量极值为 111.4 mm (图 1c 红色椭圆圈内), 雨强极值为 82.4 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; LMCS-2b 历时 11 h 产生的过程降水累计量极值达 205.5 mm (图 1c 蓝色椭圆圈内), 雨强极值为 70.1 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可见, 形态相似的 LMCS 雨带, “杜苏芮”产生的大暴雨范围更广, 降水量和雨强极值也更大。

由 LMCS-1 和 LMCS-2 的降水过程中福建省国家和区域气象观测站雨强及雨强 ≥ 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 ≥ 50 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 站数的时序变化 (图 2), 可见雨强 ≥ 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 站数, 台风“杜苏芮”有 6 个时次雨强超 100 站 $\cdot \text{h}^{-1}$, 而台风“格美”为 0 次; 雨强 ≥ 50 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 站数, “杜苏芮”小时影响站数最高达 42 站 (29 日 04 时), “格美”仅 10 站 (出现在 LMCS-2a 的 26 日 22:00,

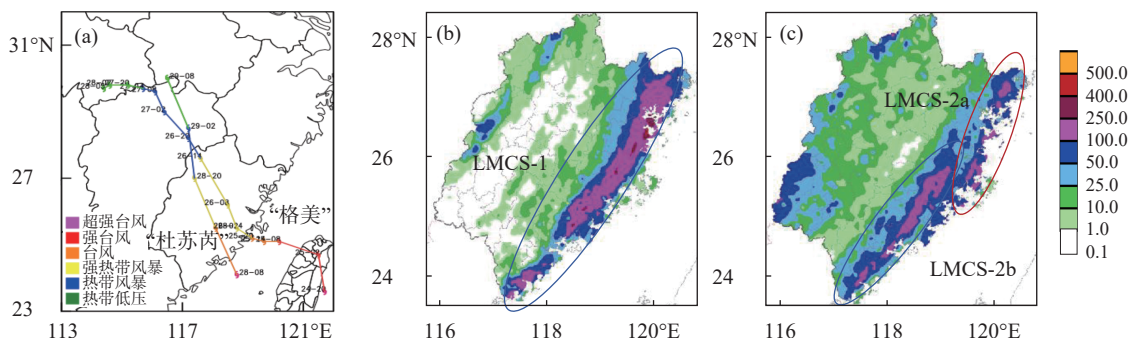


图 1 2023 年台风“杜苏芮”和 2024 年“格美”陆上路径、强度 (a) 及“杜苏芮”后部 LMCS-1 (b) 和“格美”后部 LMCS-2a、LMCS-2b (c) 在福建省造成降水量空间分布 (a 图中数字代表时间: 日-时; b、c 图中圆圈代表降水量大值区)

Fig. 1 The (a) tracks and intensities of Typhoon Doksuri in 2023 and Gaemi in 2024 after landing, and spatial distributions of the LMCS-1 at the rear of Typhoon (b) Doksuri, LMCS-2a and LMCS-2b precipitation cases at the rear of (c) Gaemi in Fujian (The numbers in Fig. 1a represent time: date-time. The circles in Fig. 1b, Fig. 1c represent areas of high precipitation)

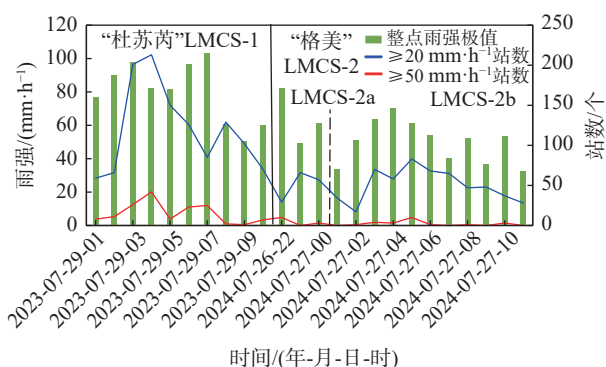


图2 2023年台风“杜苏芮”LMCS-1与2024年台风“格美”LMCS-2的降水过程福建省的雨强极值(单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)和雨强 $\geq 20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $\geq 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 站数时序变化(图中黑实线竖杠代表LMCS-1和LMCS-2过程的时间分隔线,黑虚线竖杠代表台风格美LMCS-2a和LMCS-2b过程的时间分隔线)

Fig. 2 Hourly maximum rainfall intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) and temporal variation of station counts with rainfall intensity $\geq 20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ and $\geq 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ during the precipitan cases at the rear of Typhoon Doksuri

LMCS-1 in 2023 and Gaemi LMCS-2 in 2024 in Fujian (The solid black vertical line represents the time separation line for the LMCS-1 and LMCS-2 and the dashed black vertical line represents the time separation line for the LMCS-2a and LMCS-2b processes of Typhoon Gaemi)

LMCS-2b的27日05:00);超 $80\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 整点雨强极值,“杜苏芮”持续出现6个时次,最大为 $103.6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,“格美”仅1个时次(极值 $82.4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,2024年7月26日21:00—22:00)出现在LMCS-2a内,LMCS-2b内雨强极值为 $70.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (27日03:00—04:00)。综上,台风“杜苏芮”LMCS-1降水更显著。

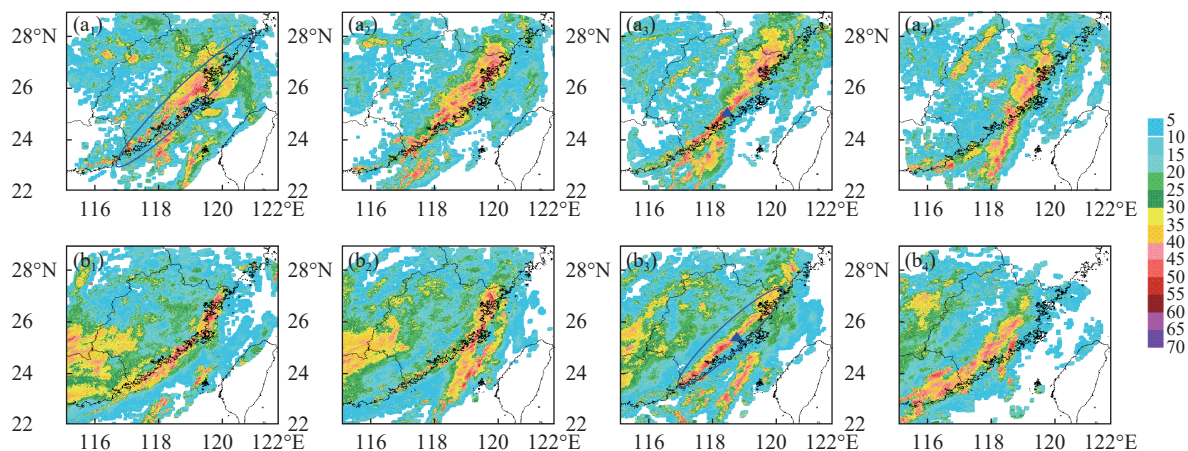


图3 2023年7月29日00:00(a₁)、04:00(a₂)、06:30(a₃)和10:00(a₄)台风“杜苏芮”LMCS-1(a₁—a₄)及2024年7月26日22:00(b₁)、27日01:00(b₂)、04:00(b₃)和10:00(b₄)台风“格美”LMCS-2(b₁—b₄)LMCS雨带雷达组合反射率因子分布(填色,单位: dBz)(图中椭圆圈内为LMCS,三角形为雨强极值点)

Fig. 3 Radar composite reflectivity (shaded, unit: dBz) factor distributions of (a₁—a₄) Typhoon Doksuri LMCS-1 and (b₁—b₄) Typhoon Gemei LMCS-2 rainbands at (a₁) 00:00 BT, (a₂) 04:00 BT, (a₃) 06:30 BT, (a₄) 10:00 BT on 29 July 2023 and at (b₁) 22:00 BT on 26 July 2024, (b₂) 01:00 BT, (b₃) 04:00 BT, (b₄) 10:00 BT on 27 July 2024 (LMCS is inside the ellipse, and the triangles represent the extreme point of rainfall intensity)

3 雨带结构特征对比

3.1 雨带组织形式对比

由雨带生消演变(图3)可见,台风“杜苏芮”东南侧即在粤闽沿岸一带不断触发多个新生对流单体,于2023年7月29日00:00起快速连成一线,向北移动中与正在衰减的外螺旋雨带连接,迅速组织加强形成一条南北向长约500 km、宽40~80 km的长LMCS-1(图3a₁椭圆圈内),强降水回波在LMCS-1上发展、加强、停滞,具有明显的后向传播特征,形成“列车效应”(图3a₂、a₃),引发沿岸大范围的短时强降水(图2);29日10:00结构松散,过程趋于结束(图3a₄),历时10 h。

台风“格美”东南侧LMCS-2雨带经历LMCS-2a与LMCS-2b雨带生消过程。LMCS-2a雨带形成:在厦门漳州近海多个新生对流单体向北移动中发展加强,于2024年7月26日17:00—20:00形成短线状LMCS(图略);26日20:40左右在漳州至泉州沿岸同样快速组织发展形成短线状LMCS,两条短线状LMCS连接后重组成一条长约500 km、宽20~50 km的长线状LMCS-2a(图3b₁),27日00:30起LMCS-2a结构松散减弱,历时约3 h左右(图3b₂和图2)。LMCS-2b形成:在粤闽沿岸一带触发出的多个对流单体北上与第一次正衰减的LMCS-2a尾部连接,快速组织加强形成一条南北向长约400 km、宽20~40 km的长线状LMCS-2b(图3b₃椭圆圈内),强降水回波同样具有明显的后向传播特征,形成的回波“列车效应”致短时强降水站数再次跃增(图2),27日

11:00 过程趋于结束 (图 3b₄), 历时 11 h。

综上, 2 次 LMCS 降水过程均具有夜雨增幅、强降水回波后向传播、降水“列车效应”等特征; 对流雨团均具有自南向北移动、影响时间长且影响范围广的共性特征。但从雨带组织形式上看, 台风“杜苏芮” LMCS-1 历经完整的一次 LMCS 雨带生消过程, 总雨量显著; 而“格美” LMCS-2 历经 LMCS-2a 和 LMCS-2b 的雨带生消过程, 空间上并未重叠, 所以总雨量弱于“杜苏芮”。由于“格美” LMCS-2b 与“杜苏芮” LMCS-1 形态相似, 均是由粤闽地区触发的多个对流单体组织发展形成, 生命史相当, 因此下文着重对 LMCS-1 与 LMCS-2b 的降水差异进行对比。

3.2 云微物理垂直结构对比

图 4 给出了台风“杜苏芮” LMCS-1 上雨强极值时段 (2023 年 7 月 29 日 06:00—07:00) 和“格美” LMCS-2b 雨强极值时段 (2024 年 7 月 27 日 03:00—04:00) 的逐 5 min 降水量、双偏振雷达参量与云闪分布的垂直结构变化。由 Z_H 显示 (图 4a₁), “杜苏芮”上空对流云体超 45 dBZ 的强回波持续时长达 45 min, 29 日 06:25 之后的降水显著增强 (超过 $10 \text{ mm} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$), 云闪活动异常活跃, -30°C 及以下各层云闪频次明显增加且密集分布在 2~6 km。06:30—06:50, 35 dBZ 回波顶高显著伸展至 -30°C 层以上 (12 km 附近);

45 dBZ 强回波顶高升至 -10°C 层附近 (7 km); 回波极值出现在 06:20—06:25 达 58 dBZ (2 km 附近), 随后降水跃增至峰值, 比回波极值滞后约 5 min。“格美”上空对流云体超 45 dBZ 的强回波时段约 35 min (27 日 03:25—04:00) (图 4a₂), 该时段内降水量明显上升, 无云闪活动。期间 35 dBZ 回波顶高伸展高度低至 8 km; 45 dBZ 强回波高度也仅伸展至 6 km 处 (0°C 层附近); 回波极值出现在 03:50 为 52 dBZ (4 km 附近), 随后降水跃增至峰值, 比回波极值也滞后约 5 min。可见云体垂直结构上, “杜苏芮”超 45 dBZ 的强回波伸展高度更高 (伸至 -10°C 层, “格美”在 0°C 层附近), 同时 50 dBZ 以上强回波持续更久。

Z_{DR} 显示, “杜苏芮”上空对流云体 Z_{DR} 柱垂直伸展至 11 km 附近 (图 4b₁), 值为 1.5~3.2 dB, 可见云内粒子尺寸大, 主要分布在 0°C 层以下及 -30°C 层附近。“格美”上空 Z_{DR} 柱垂直伸展高度至 7 km 附近 (图 4b₂), 值在 1~1.75 dB 之间, 云内粒子尺寸明显小于“杜苏芮”。

“杜苏芮”上空 K_{DP} 柱垂直高度可伸展至 -10°C 层附近 (图 4c₁), 超过 $1.6 (^\circ) \cdot \text{km}^{-1}$ 值主要出现在 6 km 以下且持续时长达 40 min, 表明云内存在较深厚的高浓度粒子数。“格美”上空 K_{DP} 柱高度仅伸展至 6 km 附近 (0°C 层) (图 4c₂), 超过 $1.6 (^\circ) \cdot \text{km}^{-1}$ 的 K_{DP} 值位

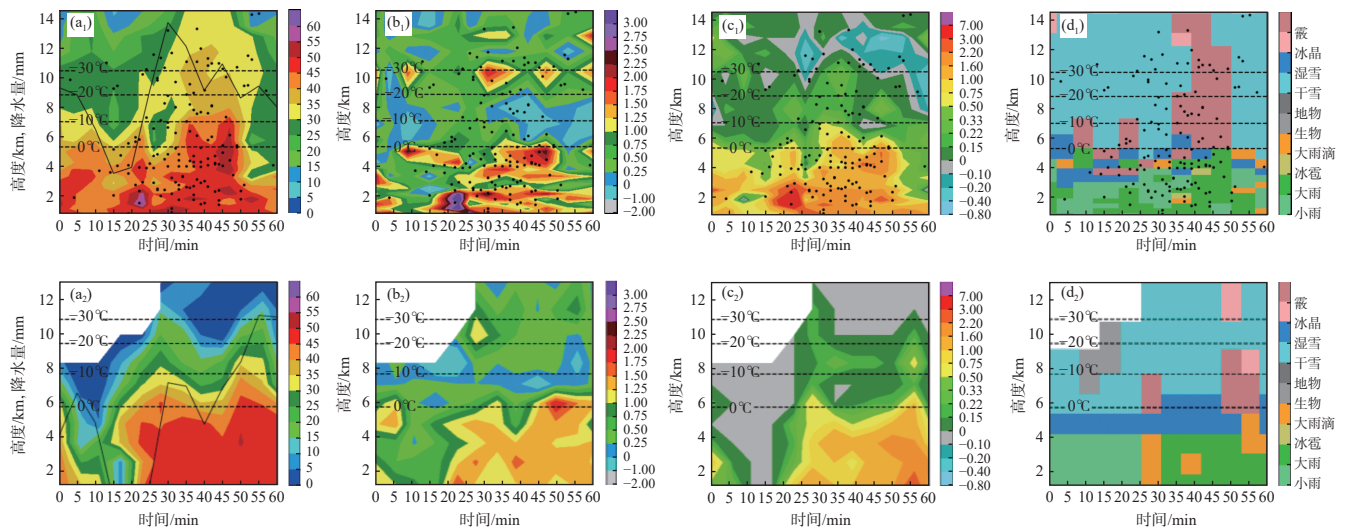


图 4 2023 年 7 月 29 日 06:00—07:00 “杜苏芮” LMCS-1 (a₁—d₁) 和 2024 年 7 月 27 日 03:00—04:00 “格美” LMCS-2b (a₂—d₂) 雨强极值点的逐 5 min 降水量 (折线, 单位: $\text{mm} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$) 和双偏振雷达 Z_H (a₁—a₂, 填色, 单位: dBZ)、 Z_{DR} (b₁—b₂, 填色, 单位: dB)、 K_{DP} (c₁—c₂, 填色, 单位: $(^\circ) \cdot \text{km}^{-1}$) 及粒子相态分类 HCL 产品 (d₁—d₂) 随高度的时间变化和相同时段内的云闪活动 (圆点) (黑色虚线由上至下依次表示 -30°C 、 -20°C 、 -10°C 和 0°C 高度)

Fig. 4 The (a₁—d₁) Typhoon Doksuri LMCS-1 at 06:00 BT to 07:00 BT on 29 July 2023 and (a₂—d₂) Typhoon Gemei LMCS-2b at 03:00 BT to 04:00 BT on 27 July 2024, (a₁—a₂) the precipitation per 5min in the maximum rainfall intensity point (broken line, unit: $\text{mm} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$) and dual-polarization radar Z_H (shaded, unit: dBZ), (b₁—b₂) Z_{DR} (shaded, unit: dB), (c₁—c₂) K_{DP} (shaded, unit: $(^\circ) \cdot \text{km}^{-1}$) parameters and (d₁—d₂) particle phase classification HCL products change with height and time and the cloud flashes during the same time period (dots) (The black dashed lines from top to bottom represent -30°C , -20°C , -10°C and 0°C height)

于4 km以下仅持续10 min,云内高浓度粒子数维持时间短且层次较浅薄。 -10°C 层以上,“杜苏芮”仍有 $0.2\sim 0.5(^{\circ})\cdot\text{km}^{-1}$ 的 K_{DP} 值,高空有一些浓度小的粒子,而“格美” K_{DP} 值为 $-0.1\sim 0.15(^{\circ})\cdot\text{km}^{-1}$,高空粒子浓度更小。

粒子相态分类HCl产品进一步显示,“杜苏芮”上空 0°C 层以上主要为大粒子的霰和干雪(图4d₁),冰相粒子数目多,大的固态冰相粒子下坠可直接融化成大雨滴直至掉落地面(Bao et al., 2022); 0°C 层以下,06:30—06:50, Z_{DR} 和 K_{DP} 未有向地面增大现象,即非暖云过程,以高浓度的大雨粒子为主导,同时在4~5 km还存在冰雹、霰和湿雪等冰相粒子,高层大冰相粒子下落融化和融化层混合水凝物的聚并增长过程形成大雨。“格美”上空 0°C 层以上主要为少量的小粒子霰及干雪(图4d₂); 0°C 层以下以液相大雨粒子为主导,粒子数目明显少于“杜苏芮”。 Z_{DR} 和 K_{DP} 具有随高度下降向地面增大特征,为暖云微物理增长过程。

综上,LMCS-1与LMCS-2b强降水的对流云体内云微物理垂直结构存在明显差异。台风“杜苏芮”雨强极值点上空 0°C 层上下固液混合粒子共同主导了大雨粒子的产生,该特征与大陆对流降水相似(Lemon, 1977);“格美”雨强极值点上空 0°C 层以下以液相粒子为主导,与热带海洋对流降水型特征相符。由于“杜苏芮”上空粒子浓度明显高于后者,致雨强显著。

4 环流形势和环境条件对比

4.1 环流形势

LMCS-1和LMCS-2强降水发生前的500 hPa形势稳定少动,块状西北太平洋副热带高压(以下简称副高)中心位于日本附近(图5a、b),5 880 gpm线靠近华东近岸,福建沿海处于台风右侧与副高之间的高线密集带中,西南气流显著;高空冷涡槽位于 40°N 以北,低层无冷空气侵入沿海地区。水汽通道主要来源于孟加拉湾到南中国海一带的西南季风输送带上

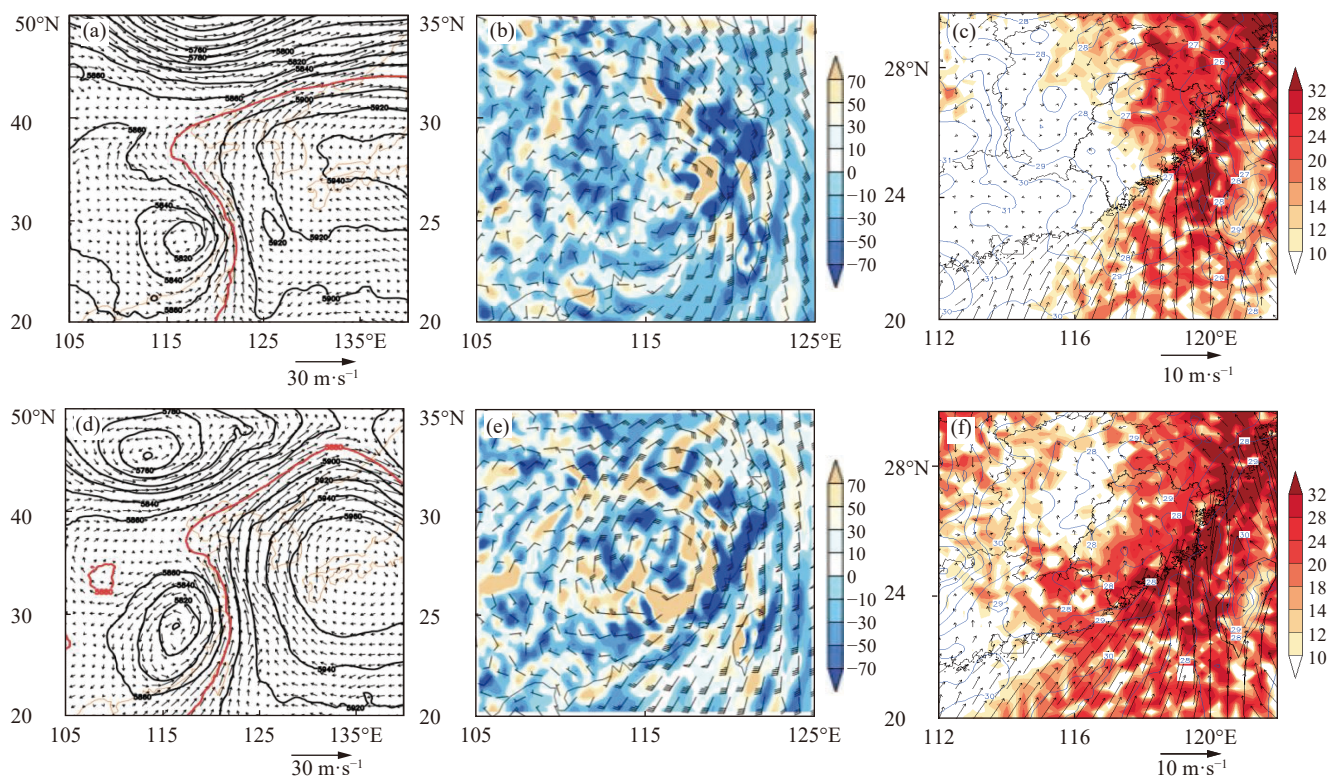


图5 2023年7月28日23:00台风“杜苏芮”(a、b、c)和2024年7月27日00:00“格美”(d、e、f)500 hPa高度场(黑色等值线,单位:gpm)和风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)(图a、d中红色等值线为5 880 gpm),850 hPa水汽通量散度[填色,单位: $10^{-6}\text{ g}\cdot(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$]和风场(风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)(b、e)和1 000—700 hPa垂直风切变值(填色,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、气温(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)及风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)(c、f)

Fig. 5 Distribution of (a, b, c) Typhoon Doksuri at 23:00 BT on 28 July 2023 and (d, e, f) Typhoon Gemei at 00:00 BT on 27 July 2024, (a, d) 500 hPa height fields (black contour lines, unit: gpm) and wind fields (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (the red contour is 5 880 gpm), (b, e) 850 hPa moisture flux divergence [shaded, unit: $10^{-6}\text{ g}\cdot(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$] and wind fields (wind vane, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (c, f) 1 000—700 hPa vertical wind shear (shaded, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperature (contours, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind fields (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(图略), 925 hPa 水汽通量值均超过 $25 \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})^{-1}$; 850 hPa 福建沿海为西南急流控制 (图 5c、d), 在低空急流的作用下, 来自南海的暖湿气流持续向沿海输送, 福建沿海地区的水汽通量辐合值低于 $-50 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})^{-1}$, 为水汽强辐合。200 hPa 流场和散度场上 (图略), 福建沿海均位于高空急流入口区右侧及南压高压环流后侧的强辐散区中。低空 (1 000—700 hPa) 垂直风切变值均在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上 (图 5e、f), 明显高于 Meng 等 (2012) 统计的 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的平均值。在 LMCS 发展及持续阶段 (图略), 低空垂直风切变值维持在 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 强风切变值致 LMCS 长久维持为强降水的产生与持续提供了重要动力条件。上

述高低空配置的共性特征为这两次 LMCS 强降水的形成提供了有利的环流形势。

4.2 环境条件

由散度场 (图 6) 可见, 福建沿海上空具有高空辐散和低空辐合的动力耦合特征, 高低空这种动力配置有利沿海上空对流云团旺盛发展, 促使降水强度得到加强。台风“杜苏芮”辐散层较“格美”深厚些, 深厚的辐散抽吸特征利于低空水汽辐合抬升作用增强, 表现在垂直上升运动上, 台风“杜苏芮”运动大值区 (小于 $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 位于 800—300 hPa 之间明显较“格美”深厚, 且运动强区持续时间更长、运动中心值也更大。

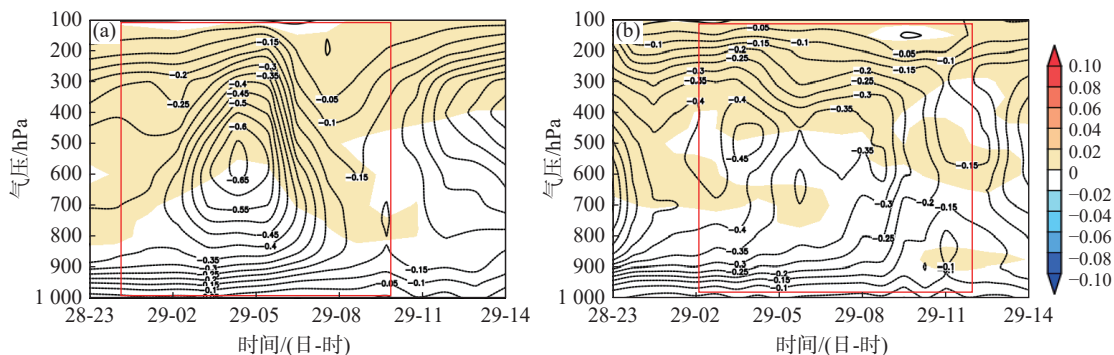


图 6 2023 年 7 月 28 日 23 时—29 日 14 时台风“杜苏芮” (a) 和 2024 年 7 月 26 日 17 时—27 日 14 时“格美” (b) 降水过程上空区域 (117°—120°E, 23.5°—28°N) 平均散度场 (填色, 单位: s^{-1}) 和垂直速度 (黑色等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 时间-高度剖面 (红色方框为 LMCS-1 和 LMCS-2 强降水过程)

Fig. 6 The (a) Typhoon Doksuri from 23:00 BT on 28 July 2023 to 14:00 BT on 29 July 2023 and (b) Typhoon Gemei from 17:00 BT on 26 July 2024 to 14:00 BT on 27 July 2024 about the area-averaged divergence (shaded, unit: s^{-1}) and vertical velocity (black contour lines, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) over the heavy rainfall cases region (117°–120°E, 23.5°–28°N) change with height (unit: hPa) and time (The red boxes represent LMCS-1 and LMCS-2 heavy rainfall cases)

图 7 进一步给出两次过程雨强极值点上空大气层结稳定度及垂直运动的变化。可见, 两次共性特征为低空均有强暖湿气流 (850 hPa 以下假相当位温 (θ_{se}) 值高于 354 K) 影响, 1 000—800 hPa 的 θ_{se} 线显著向上凸起呈现“Ω”型结构, 354 K 高 θ_{se} 线抬升至 800 hPa 附近。差异表现在对流层中层 600—500 hPa 附近“杜苏芮”上空有干冷空气侵入 (θ_{se} 低于 345 K), 而“格美”上空干冷空气较弱 (θ_{se} 为 348 K), 中层干冷低层湿暖的不稳定层结结构特征弱于前者。此外, “杜苏芮”上空的大气垂直上升运动较“格美”强, 运动中心值约为 $-1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 而“格美”运动中心值为 $-0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, “杜苏芮”运动上升区可至 600 hPa 附近, 较“格美”深厚 (800 hPa 以下)。

雨强极值点上空风廓线雷达探测到的精细风场和垂直速度随高度的时序变化显示, 动力结构存在差异 (图 8 紫方框内)。从风速上看, 台风“杜苏芮”上空盛行南风, 0 °C 层以下南风急流层深厚, 低层南风值

超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8a₁), 近地层西南暖湿气流受到海岸地形摩擦作用, 沿着海岸线辐合抬升, 雨强极值点处负涡度大值区附近 (图 8a₂ 红点处), 辐合抬升促使暖湿气流强上升运动, 该站点分钟雨量明显增幅时段内 (06:25—07:00) 风廓线探测到大气垂直速度达 $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。“格美”上空同样南风急流深厚 (图 8b₁), 但近地层雨强极值点处涡度值明显弱于“杜苏芮” (图 8b₂ 红点处), 致暖湿气流辐合抬升运动弱于前者, 站点分钟雨量明显增幅时段内 (03:25—04:00) 风廓线探测到大气垂直速度为 $3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 与图 7 分析结论相一致。另外, 台风“杜苏芮”上空 0 °C 层上下存在的冰相粒子, 其含量及尺寸均明显高于“格美”, 研究指出当冰相粒子受强上升气流影响时易产生闪电活动 (Reinhart et al., 2014; 徐良韬等, 2016; Liu et al., 2020; Qie et al., 2021), 因此“杜苏芮”活动过程中有大量闪电发生。

可见, 低空强水汽辐合、强垂直风切变、上干下

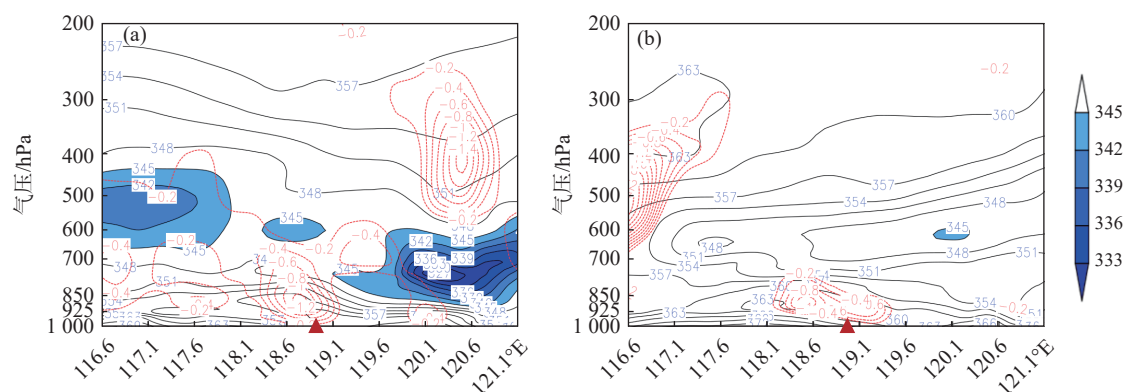


图7 2023年7月29日06:00台风“杜苏芮”沿25.1°N的经度-高度剖面(a)和2024年7月27日03:00“格美”沿25.4°N的经度-高度剖面(b)雨强极值点上空 θ_{se} (黑色等值线,单位:K)和垂直速度(红色等值线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)(红色三角形为雨强极值点经度位置)

Fig. 7 The (a) longitude-altitude profile along 25.1°N of Typhoon Doksuri at 06:00 BT on 29 July 2023 and (b) longitude-altitude profile along 25.4°N of Typhoon Gemei at 03:00 BT on 27 July 2024 about the θ_{se} (black contour line, unit: K) and vertical velocity (red contour line, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) in the maximum rainfall intensity points (The red triangles represent the positions of the maximum rainfall intensity points)

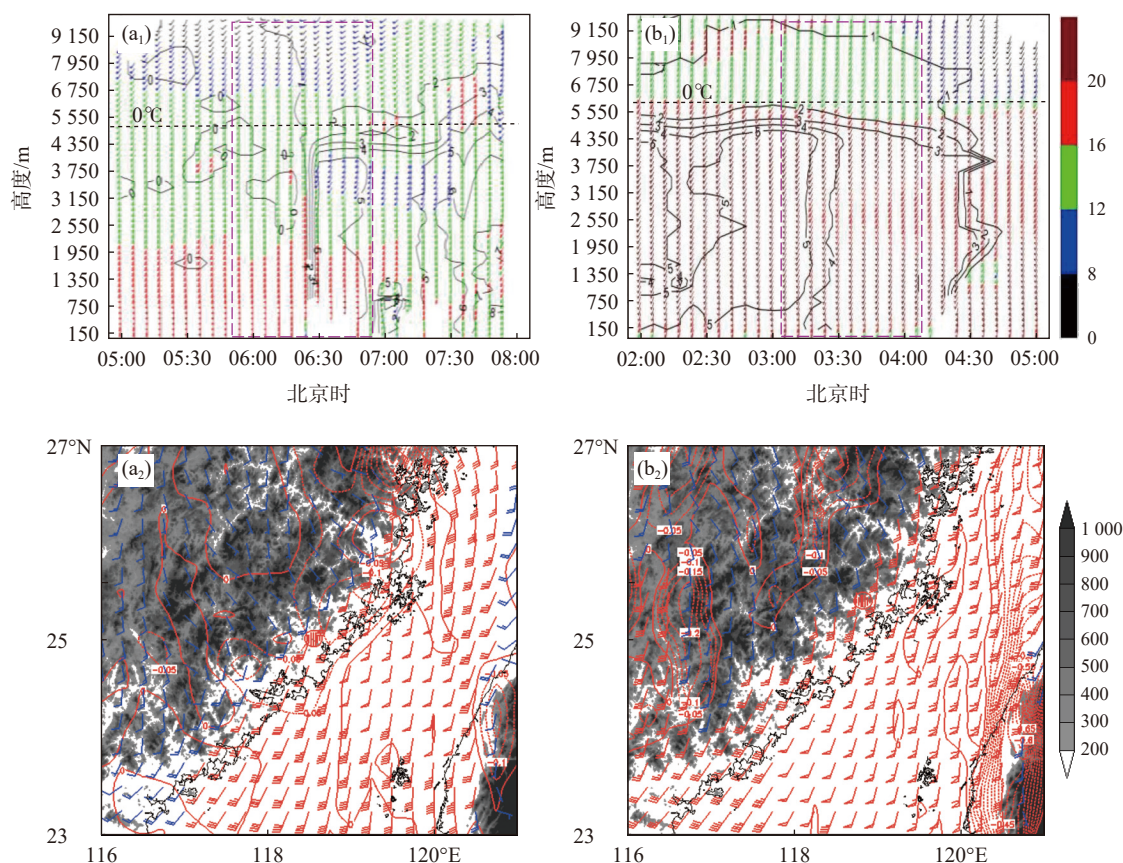


图8 2023年7月29日06:00—07:00台风“杜苏芮”(a₁—a₂)和2024年7月27日03:00—04:00“格美”(b₁—b₂)雨强极值点上空风廓线雷达探测的水平风场(风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及垂直速度(黑色等值线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)时间-高度剖面(a₁, b₁)和925 hPa风场(红色风向杆 $\geq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、涡度场(红色等值线,单位: $10^{-4}\cdot\text{s}^{-1}$)与地形(填色,单位:m)(a₂, b₂)(a₁, b₁图中紫色虚线方框为雨强极值发生时段内的风场和垂直速度,黑色虚线表示0℃高度,红色圆点为雨强极值点)

Fig. 8 The (a₁—a₂) typhoon Doksuri at 06:00 BT to 07:00 BT on 29 July 2023 and (b₁—b₂) Typhoon Gemei at 03:00 BT to 04:00 BT on 27 July 2024 in the maximum rainfall intensity points about (a₁, b₁) the horizontal wind field (wind vane, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and vertical velocity (black contour line, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) detected by wind profile radar, and (a₂, b₂) wind field at 925 hPa (red wind direction rods are above $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), vorticity field (red contour lines, unit: $10^{-4}\cdot\text{s}^{-1}$) and terrain (shaded, unit: m) (The purple dashed box represents the wind field and vertical velocity occurring during the period of extreme rainfall intensity in Fig. 8a₁, 8b₁. The black dashed line represents 0℃ height. The red dots are the precipitation extreme point)

湿的热力不稳定层结及西南急流的持续引导提供 LMCS 触发生成及持续发展的有利环境条件,从而导致 LMCS 强降水产生。但动力条件上台风“杜苏芮” LMCS-1 过程大气垂直运动表现更强且持续时间更长。

5 结论与讨论

针对 2023 年第 5 号台风“杜苏芮”和 2024 年第 3 号台风“格美”登闽后 LMCS 雨带形态极其相似但产生的降水强度差异大的特征,本文利用福建省气象观测站、三维闪电、结合 S 波段、双偏振和风廓线雷达及 ERA5 再分析数据,从降水强度、雨带组织形式、闪电活动、降水云微物理结构及环流形势和环境条件等差异进行诊断与对比分析,得到以下主要结论:

(1) LMCS-1 和 LMCS-2 雨带均具有累积雨量大、持续时间长、夜雨明显、雨强极值强、强降水回波后向传播及降水“列车效应”等特征。台风“杜苏芮”的过程总雨量 (431.7 mm),雨强极值 ($103.6 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 均显著高于“格美”。

(2) LMCS-1 和 LMCS-2 雨带强降雨强上空闪电活动差异显著。台风“杜苏芮”云闪活跃,强雷暴特征显著;台风“格美”云闪稀少,表现为弱雷暴特征。

(3) 双偏振雷达多参量的垂直结构反演结果表明:两次强降水的对流云体内云微物理垂直结构存在明显差异。台风“杜苏芮”雨强极值点上空的强对流主体质心高于 0°C 层, 0°C 层上下固液混合粒子共同主导了大雨粒子的产生,为非暖云聚合碰并增长过程,该特征与大陆对流降水相似。台风“格美”雨强极值点上空的强对流主体质心低于 0°C 层,以液相大雨和小雨混合粒子为主导,为暖云微物理增长过程,与热带海洋对流降水特征相符。

(4) 两次 LMCS 强降水形成的环流形势和环境条件的异同点在于:低空强水汽辐合 (低于 $-50\times 10^{-6} \text{ g}\cdot(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$)、强垂直风切变 ($12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上)、上干下湿的热力不稳定层结及西南急流的持续引导提供 LMCS 触发生成及持续发展的有利环境条件,但动力条件上台风“杜苏芮” LMCS-1 过程大气垂直运动表现更强 (风廓线探测到垂直速度达 $5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上明显超过“格美”的 $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)。此外,台风“杜苏芮”上空 0°C 层上下冰相粒子的含量及尺寸均明显高于“格美”,受强上升气流影响时易产生闪电活动。两次 LMCS 降水峰值出现在 Z_H 值明显跃增至 52 dBz (0°C 层以下)或超过该值后的 5 min。“杜苏芮”上空双偏振参量 $Z_{DR}>2.5 \text{ dB}$, $K_{DP}>1.6 (^\circ)\cdot\text{km}^{-1}$ 持续时长达 30 min 以上,其云内存在的大尺寸、高浓度粒子数远超“格美”,致雨强显著。

台风强降水成因复杂,本文仅对两次台风相似 LMCS 雨带上不同组织结构的对流云体产生降水差异的观测特征及成因做了初步分析,通过双偏振雷达多参量反演产品分析,发现不同浓度、不同相态的粒子以及是否有冰相粒子参与的冷雨微物理过程会产生明显的降水强度,若对流云体内闪电密集产生,雨强将明显跃增。但针对雨带闪电形成的成因、水凝物的形成及不同相态水凝物间的转换及各因子的综合作用机理等问题仍需进一步开展深入研究,期许加深对台风极端降水天气的认识和理解,进一步提高台风强降水的预报预警能力。

参考文献 (References):

- 陈涛,湛芸,方翀,等.2024.“23·7”华北极端暴雨精细特征和天气学成因分析[J].*气象学报*,82(5):600–614. Chen T, Chen Y, Fang C, et al. 2024. Fine characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and associated synoptic weather patterns [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,82(5):600–614 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2024.20240036
- 崔梦雪,向纯怡,张晗昀,等.2023.台风“杜苏芮”(2305)引发福建极端强降水的特征分析[J].*海洋气象学报*,43(4):11–20. Cui M X, Xiang C Y, Zhang H Y, et al. 2023. Characteristics of extreme precipitation in Fujian induced by Typhoon Doksuri (2305) [J]. *Journal of Marine Meteorology*,43(4):11–20 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096–3599.2023.04.002
- 崔梦雪,张晗昀,陈德花,等.2024.2023 年 4 月 18 日厦门暖区特大暴雨的中尺度特征及低空急流的作用[J].*暴雨灾害*,43(5):521–531. Cui M X, Zhang H Y, Chen D H, et al. 2024. Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(5): 521–531 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–107
- 姬雪帅,杜晖,张曦丹,等.2023.基于 VDRAS 资料探究河北中南部一次弓状强飑线的演变和机理[J].*沙漠与绿洲气象*,17(3):44–51. Ji X S, Du H, Zhang X D, et al. 2023. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring in the center-south part of Hebei province based on VDRAS data [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,17(3):44–51 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.03.006
- 林小红,蒋滔,张文娟,等.2025.“杜苏芮”(2023)台风外雨带闪电活动特征及与强降水微物理结构的关系[J].*气象学报*,83(1):80–95. Lin X H, Jiang T, Zhang W J, et al. 2025. Lightning activity in the outer rainbands of Typhoon Doksuri (2023) and its relationship with the microphysical structure of heavy rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,83(1):80–95 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2025.20240057
- 施娟,陈翼,刘立兵,等.2025.基于 X 波段相控阵双偏振雷达的短时强降水分析[J].*高原山地气象研究*,45(1):105–112. Shi J, Chen Y, Liu L B, et al. 2025. Analysis of short-term heavy precipitation process based on X-band phased array dual-polarization radar [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,45(1):105–112 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2025.01.012
- 唐明晖,付炜,罗源,等.2024.长沙一次大暴雨的双偏振及风场反演特征

- 分析[J].*热带气象学报*,40(4):623–632. Tang M H, Fu W, Luo Y, et al. 2024. Analysis of dual-polarization and wind field inversion characteristics of a heavy rainstorm in Changsha [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,40(4):623–632 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2024.055
- 汪舵,刘黎平,吴翀.2017.基于相态识别的S波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J].*气象*,43(9):1041–1051. Wang D, Liu L P, Wu C. 2017. An optimization rainfall algorithm of S band dual-polarization radar based on hydrometeor identification [J]. *Meteorological Monthly*,43(9):1041–1051 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.002
- 王芳,郑秀书,崔雪东.2017.西北太平洋地区热带气旋闪电活动的气候学特征及其与气旋强度变化的关系[J].*大气科学*,41(6):1167–1176. Wang F, Qie X S, Cui X D. 2017. Climatological characteristics of lightning activity within tropical cyclones and its relationship to cyclone intensity change over the Northwest Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,41(6):1167–1176 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17102
- 王艳,郑栋,张义军.2011.2000–2007年登陆台风中闪电活动与降水特征[J].*应用气象学报*,22(3):321–328. Wang Y, Zheng D, Zhang Y J. 2011. Typhoon processes making landfall in China from 2000 to 2007 [J]. *Journal of Applied Atmospheric Sciences*,22(3):321–328 (in Chinese)
- 徐良韬,张义军,张文娟,等.2016.台风莫拉菲(2009)登陆前后电荷结构演变的模拟研究[J].*气象学报*,74(6):1002–1016. Xu L T, Zhang Y J, Zhang W J, et al. 2016. Simulation of the evolution of the charge structure during the landfall of Typhoon Molave (2009) [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,74(6):1002–1016(in Chinese).doi:10.11676/qxxb2016.071
- 杨美容,袁铁,郑秀书,等.2011.西北太平洋热带气旋的闪电活动、雷达反射率因子和冰散射信号特征分析[J].*气象学报*,69(2):370–380. Yang M R, Yuan T, Qie X S, et al. 2011. An analysis of the characteristics of lightning activities, radar reflectivity factor and ice scattering for tropical cyclones over the western North Pacific [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,69(2):370–380 (in Chinese) doi:10.11676/qxxb2011.032
- 杨秀庄,邓世有,李力,等.2025.多单体强风暴影响下的一次极端强对流天气中尺度特征及触发机制[J].*高原山地气象研究*,45(4):28–37. Yang X Z, Deng S Y, Li L, et al. 2025. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of an extreme severe convection under the influence of multi-cell strong storms [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,45(4):28–37. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.04.003
- 俞小鼎.2011.强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J].*气象科技进展*,1(3):31–41. Yu X D. 2011. Detection and warnings of severe convection with doppler weather radar [J]. *Advances in Meteorological Science Technology*,1(3):31–41 (in Chinese)
- Bao X W, Wu L G, Zhang S, et al. 2020. Distinct raindrop size distributions of convective inner- and outer-rainband rain in Typhoon Maria (2018) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,125(14):e2020JD032482. doi:10.1029/2020JD032482
- Bao X W, Zhang S, Liang Y. 2022. Microphysical differences in the concentric eyewalls of Typhoon Lekima (2019) [J]. *Geophysical Research Letters*,49:e2022GL100579. doi:10.1029/2022GL100579
- Chen B J, Hu Z Q, Liu L P, et al. 2017. Rain-drop size distribution measurements at 4, 500 m on the Ti-betan Plateau during TIPEX-III [J]. *Journal of Geophysical Research*,122:11092–11106. doi:10.1002/2017JD027233
- Lemon L R. 1977. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report [C]/NOAA Tech Memo, NWS NSSFC1, 60pp. [NTISNO. PB-273049]
- Liu D X, Qie X S, Chen Y C, et al. 2020. Investigating lightning characteristics through a supercell storm by comprehensive coordinated observations over North China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(8):861–872. doi:10.1007/s00376-020-9264-x
- Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China [J]. *Monthly Weather Review*,140:445–470. doi:10.1175/MWR-D-10-05080.1
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnica D S, et al. 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS [J]. *Weather Forecasting*,24(3):730–748. doi:10.1175/2008WAF2222205.1
- Qie X S, Yuan S F, Chen Z X, et al. 2021. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunderstorms over the Beijing metropolitan region [J]. *Science China Earth Sciences*,64(1):10–26. doi:10.1007/s11430-020-9656-8
- Reinhart B, Fuelberg H, Blakeslee R, et al. 2014. Understanding the relationships between lightning, cloud microphysics, and airborne radar-derived storm structure during Hurricane Karl (2010) [J]. *Monthly Weather Review*,142(2):590–605. doi:10.1175/MWR-D-13-00008.1
- Wang L, Bao X W, Chen G, et al. 2025. Microphysical evolution throughout the unprecedented short-term heavy precipitation caused by Typhoon Haikui (2023) [J]. *Geophysical Research Letters*,52,e2024GL112680. doi:10.1029/2024GL112680
- Wang F, Qie X S, Wang D F. 2018. Lightning activity in tropical cyclones and its relationship to dynamic and thermodynamic parameters over the Northwest Pacific [J]. *Atmospheric Research*,213:86–96. doi:10.1016/j.atmosres.2018.05.027
- Wang M J, Zhao K, Lee W C, et al. 2018. Microphysical and kinematic structure of convective-scale elements in the inner rainband of Typhoon Matmo(2014) after landfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,123(12):6549–6564. doi:10.1029/2018JD028578
- Zhao D J, Gao W H, Xu H X, et al. 2022. A modeling study of cloud physical properties of extreme and non-extreme precipitation in land-falling typhoons over China [J]. *Atmospheric Research*,277:106311. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106311
- Zhang W J, Hui W, Lyu W, et al. 2020. FY-4A LMI observed lightning activity in Super Typhoon Mangkhut(2018) in comparison with WWLLN data [J]. *Journal of Meteorological Research*,34(1):1–17. doi:10.1007/s13351-020-9500-4