

2024年台风“格美”造成邵阳暴雨的成因分析

谢忆南, 黄俊翔, 肖思晗, 王晶晶, 张俊利, 向 钢

邵阳市气象局气象台, 湖南 邵阳

收稿日期: 2025年8月13日; 录用日期: 2025年9月11日; 发布日期: 2025年9月19日

摘 要

台风“格美”残余环流在湖南省北部缓慢西移的过程中, 给邵阳地区带来了大范围持续暴雨天气。使用常规观测资料及ERA5再分析资料, 对台风“格美”残余环流导致邵阳地区暴雨的过程进行了分析。结果表明: (1) 邵阳暴雨区呈现“高层强上升($< -2 \text{ Pa/s}$)、中层下沉、低层弱上升”的分层特征。东北部暴雨依赖高层强上升运动与低层高湿(比湿 $q > 15 \text{ g/kg}$)、高热力不稳定(假相当位温 $\theta_{se} > 356 \text{ K}$)形成动力-湿度协同机制, 降水持续时间长; 西北部暴雨中心依赖“下暖湿-上干冷”不稳定层结, 降水突发性强但持续时间较短。(2) 850 hPa水汽输送通道在暴雨区稳定维持, 中心处水汽通量强度大于 $16 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$, 东北侧暴雨发生前两至三个小时有显著的水汽辐合。(3) 东北侧暴雨中心上空存在明显的湿对称不稳定($\text{MPV} < 0$ 且 $\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \leq 0$)与高层强上升运动协同增强对流的有序组织, 形成持续性强降水;

西北部暴雨中心仅表现为对流不稳定($\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \leq 0$), 缺乏湿对称不稳定的协同作用, 导致降水以短时强降水为主。

关键词

垂直运动, 水汽输送, 湿对称不稳定

Analysis of the Causes of the Heavy Rainfall in Shaoyang Caused by Typhoon “Gaemi” in 2024

Yinan Xie, Junxiang Huang, Sihan Xiao, Jingjing Wang, Junli Zhang, Gang Xiang

Meteorological Observatory, Shaoyang Meteorological Bureau, Shaoyang Hunan

Received: Aug. 13th, 2025; accepted: Sep. 11th, 2025; published: Sep. 19th, 2025

Abstract

As the remnants of Typhoon Gaemi slowly moved westward across northern Hunan Province, they brought widespread and persistent heavy rainfall to the Shaoyang region. Using conventional observational data and ERA5 reanalysis data, we analysed the process by which the remnants of Typhoon Gemi caused heavy rainfall in the Shaoyang region. The results indicate: (1) The Shaoyang heavy rainfall area exhibits a layered characteristic of “strong upward motion in the upper layers (< -2 Pa/s), sinking in the middle layers, and weak upward motion in the lower layers”. The heavy rainfall in the northeastern region relies on a dynamic-humidity synergy mechanism formed by strong upward motion in the upper layers, high humidity in the lower layers (specific humidity $q > 15$ g/kg), and high thermal instability (pseudo-equivalent potential temperature > 356 K), resulting in prolonged rainfall duration; The northwestern heavy rainfall centre relied on an unstable layer structure of “warm and humid below, dry and cold above”, resulting in sudden but short-lived precipitation. (2) The 850 hPa water vapour transport channel remained stable in the heavy rainfall area, with a water vapour flux intensity greater than 16 g/(cm·hPa·s) at the centre. Significant water vapour convergence occurred two to three hours before the onset of heavy rainfall in the northeastern region. (3) Above the northeastern heavy rainfall centre, there is a clear wet symmetric instability ($MPV < 0$ and $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \leq 0$) that synergistically enhances convection with strong upper-level upward motion, forming sustained heavy rainfall; the northwestern heavy rainfall centre only exhibits convective instability ($\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \leq 0$) and lacks the synergistic effect of wet symmetric instability, resulting in precipitation primarily consisting of short-duration heavy rainfall.

Keywords

Vertical Motion, Water Vapour Transport, Wet Symmetry Instability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是全球受台风影响最严重的国家之一，台风登陆前后的异常变化，如台风路径、强度和结构等，往往会造成重大人员伤亡与经济损失[1]。西北太平洋作为全球台风活动最活跃的海域，年均生成约 27 个台风，其中约 15% 的台风会深入内陆并引发大范围强降水[2]。相较于沿海平原区，内陆山区因地形抬升、中低层环流辐合及中纬度系统强迫等复杂动力条件，往往成为台风暴雨的“增幅区”[3]。例如，2024 年台风格美登陆后，导致邵阳市多站点 24 小时降雨量突破 250 mm。

邵阳地处湖南西南部，地形梯度显著，受台风影响的频次远不及东南沿海地区，但台风却是造成该地区大范围暴雨灾害的主要系统之一。由于台风残余涡旋(以下简称残涡)在陆地上的维持和复苏过程不仅包括复杂的海陆气相互作用，同时也存在多尺度系统交杂和多天气系统配合的复杂过程，因此对其进行准确预报仍十分困难[4]。例如历史上造成严重灾害的“75·8”“96·8”“21·7”暴雨过程都与台风深入内陆后残涡的长时间维持和停滞少动有关[5]-[8]。

当前台风暴雨研究多聚焦于沿海平原地区，对内陆山区台风暴雨的动力学机制、地形强迫效应及多

尺度系统相互作用的研究仍显不足[9]。特别是台风残余环流与中纬度天气系统(如西风槽、副热带高压)形成复杂环流配置时,其水汽输送路径、垂直上升运动及能量转换过程的区域特异性亟待深入探讨。因此,本论文通过常规观测资料以及 ERA5 再分析资料,分析台风“格美”残余环流导致邵阳暴雨过程中的动力热力条件、不稳定条件以及区域降水差异,为今后邵阳地区台风降水预报积累经验。

2. 资料与方法

2.1. 资料来源

本文使用的资料时间 2024 年 7 月 28 日 00 时~29 日 08 时(北京时,下同),包括:(1)地面区域加密观测资料;(2)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的 ERA5 全球再分析数据(时间分辨率 1 h,空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)。

2.2. 研究方法

使用再分析资料分析了此次台风暴雨过程中的大尺度环流背景、水汽条件、动力条件及热力条件对降水的影响。

$$\text{湿位涡 MPV} (M_{pv}) \text{的表达式为: } M_{pv} = -g \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)。$$

3. 天气实况

台风“格美”于 7 月 20 日在菲律宾以东洋面生成,随后向西北方向快速移动并持续增强,于台湾地区东部加强为超强台风(中心附近最大风速 52 m/s,中心气压 935 hPa)。7 月 25 日 00 时,台风以强台风级(48 m/s, 945 hPa)登陆台湾地区东部沿海;登陆后强度迅速衰减,随后移入台湾海峡。25 日 20 时,台风以台风级(33 m/s, 972 hPa)在福建莆田秀屿区二次登陆;登陆后继续向西北方向快速移动,强度快速减弱,26 日 08 时减弱为强热带风暴级,当日午后进入江西境内并进一步减弱为热带风暴级。27 日 20 时,台风强度降至热带低压级(15 m/s, 998 hPa),中心位于湖北与江西交界处;随后残余环流向西移动,最终于 29 日 08 时在湖南西北部消散(图 1)。值得注意的是,台风“格美”残余环流在湖南省境内滞留时间长达 24 小时,引发大范围持续性暴雨灾害。

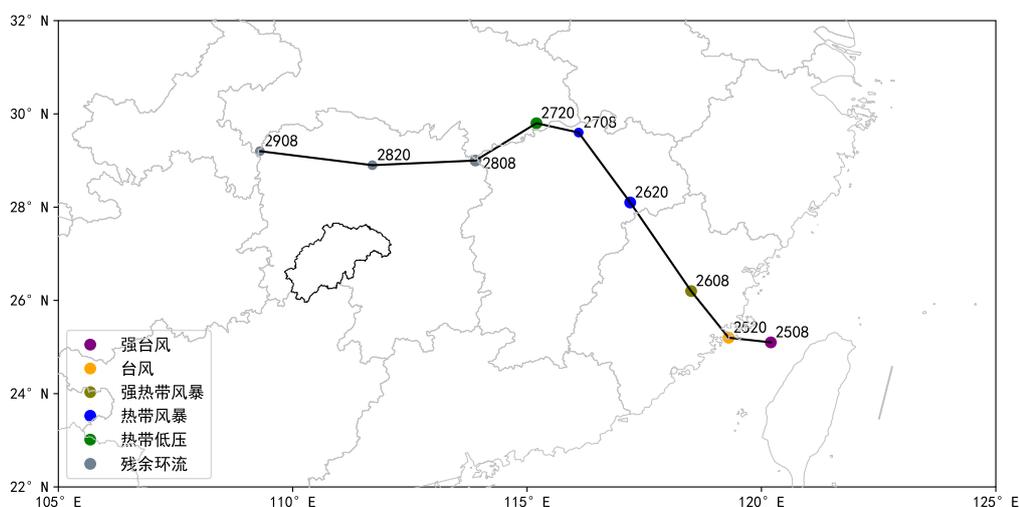


Figure 1. Track of Typhoon Gaemi
图 1. 台风“格美”路径图

受台风“格美”残余环流影响，7月28日早晨邵阳东北部开始出现降水，随后雨区扩展到邵阳西北部，随着残余环流的一路西行，暴雨区呈现自东北向西北的传播特征。邵阳北部区域普降暴雨，100 mm以上降水区主要集中于邵阳市区、邵东市及新邵县东部(图 2(a))。邵阳过程最大降水量出现在东北部的的新邵县潭府站，为 328 mm，最大小时雨强 49.5 mm·h⁻¹。从东北部(新邵县潭府站)到西北部(洞口县醪田站)大暴雨中心逐小时降雨量分布上看(图 2(b))，东北部降水开始早，降水强度大，持续时间长(6 h，28 日 09 时~15 时)；西北部降水开始晚，降水持续时间短(3 h，28 日 15 时~18 时)，降水极端性更显著(最大小时雨强达 57 mm·h⁻¹)。基于此，本文将重点剖析台风“格美”残余环流西移过程中引发邵阳持续性暴雨的动力与热力机制。

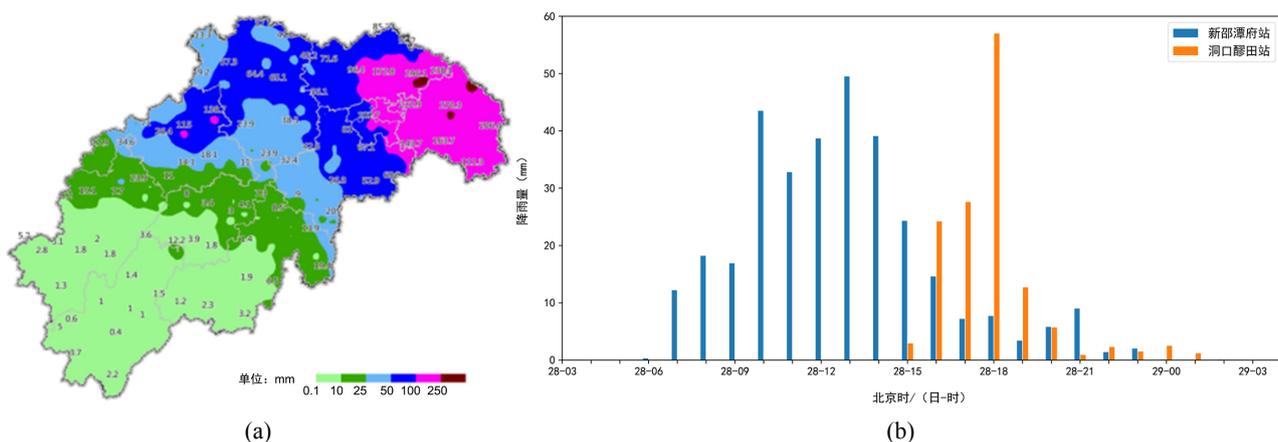


Figure 2. (a) Cumulative precipitation in Shaoyang City from 08:00 BT 28 to 08:00 BT 29 July 2024, and (b) hourly rainfall intensity at Xinshao Tanfu Station and Dongkou Laotian Station from 03:00 BT 28 to 03:00 BT 29 July 2024

图 2. 2024 年 7 月 28 日 08 时~29 日 08 时邵阳市累积降水量(a), 28 日 03 时~29 日 03 时新邵潭府站和洞口醪田站小时雨强 (b)

4. 高空环流背景场

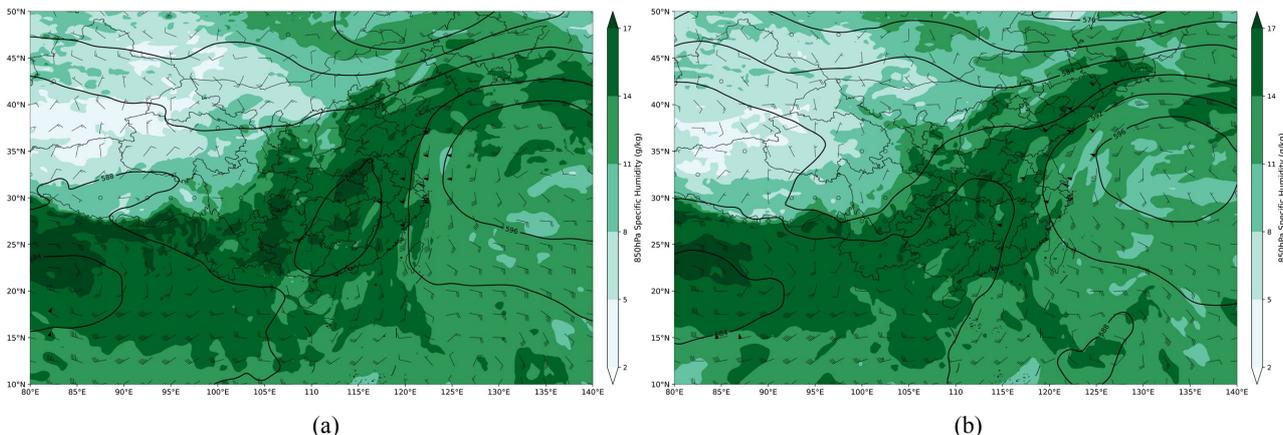


Figure 3. 500 hPa geopotential height field (contour lines, units: dagpm), wind field (vectors, units: m/s), and 850 hPa specific humidity (shaded, units: g/kg) spatial distribution at (a) 20:00 BT 27 July 2024 and (b) 08:00 BT 28 July 2024

图 3. 2024 年 7 月 (a) 27 日 20:00、(b) 28 日 08:00 500 hPa 位势高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(矢量, 单位: m/s)和 850 hPa 比湿(填色, 单位: g/kg)空间分布

9 月 27 日 08 时起，西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)发生显著调整，呈现快速加强并向西延

伸的态势，在山东、河北及河南北部一带形成稳定的“高压坝”系统。该高压坝的建立有效阻挡了台风“格美”残余环流的北上路径，迫使其转向西移(图略)。本文聚焦邵阳强降水关键期(28日)，结合多高度层环流形势与物理量场特征展开分析：从500 hPa的环流形势来看，图3(a)，27日20时台风“格美”残余环流位于湖南东北部，处于大陆高压范围内，进而使得“格美”残余环流移动缓慢，其西侧形成了一条通向邵阳地区的水汽通道，此时邵阳地区850 hPa大气比湿达到14 g/kg以上。28日08时(图3(b))，副高进一步西伸北抬，与大陆高压实现“打通”，在台风残余环流的北部及西部边界形成更稳定的“高压坝”系统。该高压坝的维持不仅延缓了台风残余环流的西行速度，同时使其西侧的水汽通道得以持续稳定。此时，邵阳东北部850 hPa风场转为西北风，与低层东南风形成显著的水平风切变(西北风与东南风的垂直切变增强)，这种风场配置触发了上升运动的有效发展，进而推动邵阳地区降水强度快速增强，标志着强降水阶段的开启。

5. 强降水物理机制

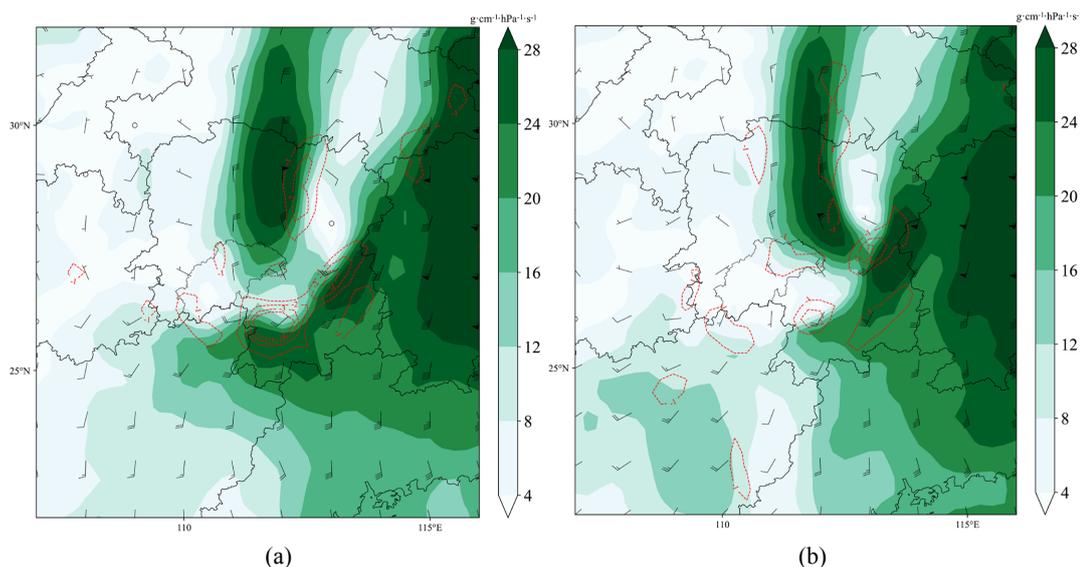
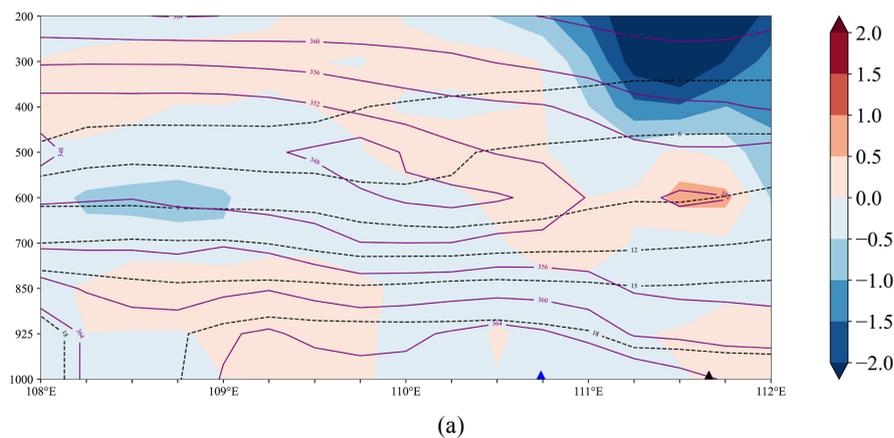


Figure 4. 850 hPa wind field (vectors, units: m/s), water vapor flux divergence (red dashed lines, units: 10^{-6} g/(cm²·hPa·s)), and water vapor flux (shaded areas, units: g/(cm²·hPa·s)) spatial distributions at (a) 03:00 BT and (b) 07:00 BT in 28 July 2024
图 4. 2024 年 7 月 28 日 (a) 03:00、(b) 07:00 850 hPa 风场(矢量, 单位: m/s)、水汽通量散度(红色虚线, 单位: 10^{-6} g/(cm²·hPa·s))和水汽通量(填色, 单位: g/(cm²·hPa·s))的空间分布

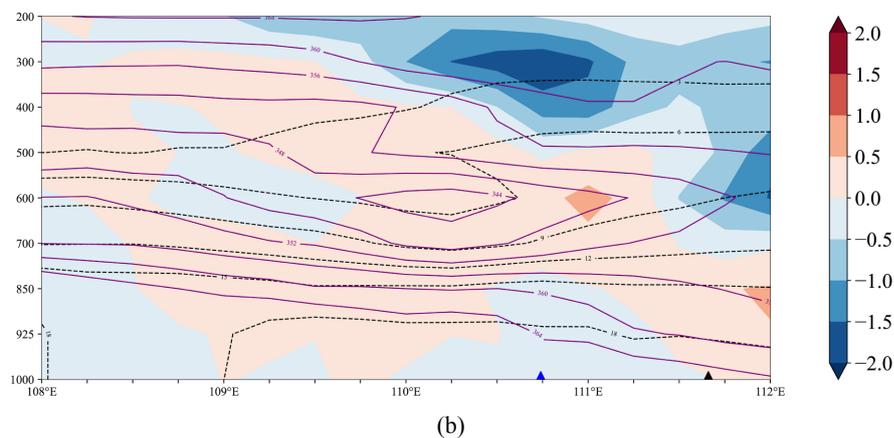
强降水的发生需要持续的水汽输送，从850 hPa水汽通量与水汽通量散度来看，28日03时(图4(a))，在湖南省中北部形成起一条水汽输送通道，其强度达24 g/(cm²·hPa·s)，在邵阳市东北侧与西北侧部分区域出现水汽通量辐合，辐合强度达 -0.8×10^{-6} g/(cm²·hPa·s)。这种“通道-辐合”耦合结构为邵阳市强降水提供了关键的水汽输入条件。28日07时(图4(b))，随着台风残余环流西移，水汽输送通道呈现东移的调整趋势，此时湖南省中北部水汽通量强度减弱至16 g/(cm²·hPa·s)，但其辐合区域显著扩展，覆盖整个邵阳市北部。进一步分析西北部强降水(15时~18时，小时雨强 ≥ 20 mm)的水汽条件发现，其发生前两小时(13时~15时)并未出现显著水汽辐合(图略)。这一现象可能与短历时强降水的特殊水汽供需机制有关：一方面，西北部降水持续时间仅1~2小时，局地水汽需求总量较低，可能通过边界层短程输送(如海风辐合或地形抬升引发的局地蒸发)即可满足[10]；另一方面，垂直运动在该过程中起主导作用——14时至15时西北部上空存在弱上升运动，可将低层未显著辐合的水汽快速抬升至凝

结高度,配合凝华增长形成短历时强降水[11]。此外,高时空分辨率观测表明,此类短历时强降水的核心水汽辐合可能发生在更小尺度(如对流单体内部),常规再分析数据的水平分辨率($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)难以捕捉其精细结构[12]。

接下来,我们从暴雨中心的垂直剖面图可以看出,7月28日09时(图5(a)),东北侧暴雨中心中低层(850至700 hPa)存在弱上升运动,中层(600至500 hPa)存在较强下沉运动,其值为 0.8 Pa/s ,高层(400 hPa以上)强上升运动,最大值 $< -2 \text{ Pa/s}$ 。高层的强上升运动可以作为关键动力条件,将低层高比湿水汽持续输送至凝结高度以上。同时,850 hPa以下高比湿($q > 15 \text{ g/kg}$)与中低层相当位温高值($\theta_{se} > 356 \text{ K}$)的热力学特征,表明该区域仅需弱上升运动即可触发水汽凝结,为降水提供持久的“燃料”条件。相比之下,西北侧暴雨中心高层(400 hPa以上)无显著上升运动,尽管中低层同样具备低层高比湿($q > 15 \text{ g/kg}$)与高不稳定层结($\theta_{se} > 356 \text{ K}$),但因缺乏持续的动力抬升机制,无法触发初始对流活动[3]。28日13时(图5(b)),东北侧暴雨中心中低层(700 hPa以下)转为下沉运动,700 hPa以上维持上升运动,但强度明显减弱。从小时雨强来看,东北侧降水还有所发展,这可能和低层热力条件相关;西北侧暴雨中心在中低层(1000至850 hPa)出现弱上升运动,中层(850至500 hPa)出现深厚的下沉气流,高层(400 hPa以上)出现强上升运动,最大值 $< -2 \text{ Pa/s}$ 。此外,西北侧暴雨中心850至700 hPa层 θ_{se} 由364 K降至352 K,这一特征表明,大气形成了“下暖湿(850 hPa以下高 θ_{se})、上干冷(700 hPa至500 hPa以上相对干冷)”的不稳定能量储备,处于强对流不稳定状态——此时任何弱抬升触发机制均可释放潜热,驱动对流云体快速发展,导致西北侧暴雨中心多以短时强降水为主,降水持续时间较短。28日18时(图5(c)),东北侧暴雨中心1000~500 hPa全面转为下沉气流,降水逐渐结束;西北侧暴雨中心虽仍维持强对流不稳定状态,但高层强上升运动中心西移,水汽输送与对流触发条件减弱,最终降水趋于终止。



(a)



(b)

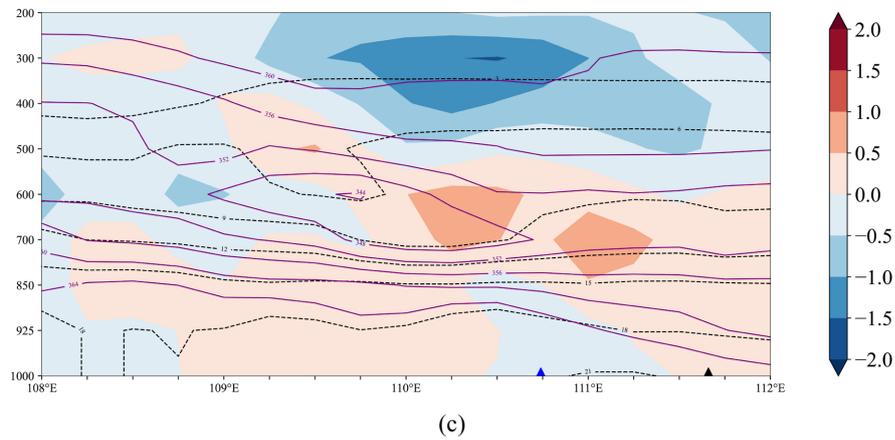
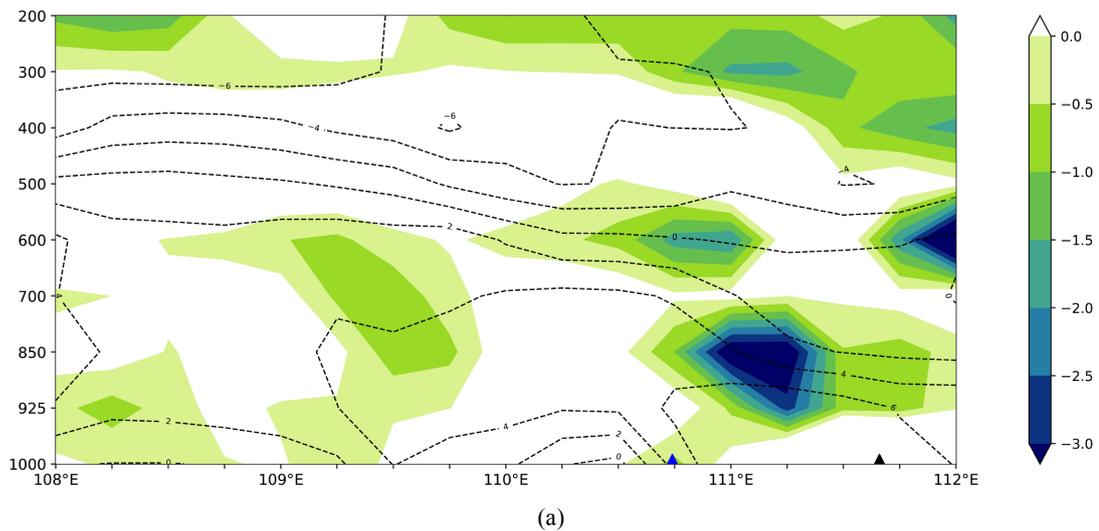


Figure 5. Vertical velocity (shaded, units: Pa/s), equivalent potential temperature (purple solid line, units: K), and specific humidity (black dashed line, units: g/kg) vertical cross-section diagram (black triangles represent the northeastern heavy rain center, blue triangles represent the northwestern heavy rain center, same below) at (a) 09:00 BT, (b) 13:00 BT and (c) 18:00 BT in 28 July 2024

图 5. 2024 年 7 月 28 日 (a) 09:00、(b) 13:00、(c) 18:00 垂直速度(填色, 单位: Pa/s)、假相当位温(紫色实线, 单位: K)和比湿(黑色虚线, 单位: g/kg)的垂直剖面图(黑色三角形代表东北侧暴雨中心、蓝色三角形代表西北侧暴雨中心, 下同)

28 日 09 时(图 6(a)), 台风残余环流中心已移至湖南中部区域, 东北侧暴雨中心上空(925 至 700 hPa 层)存在 $MPV < 0$ 且 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \leq 0$ 的区域, 大气表现为湿对称不稳定。此处的湿对称不稳定是由湿斜压性引起的, 垂直风切变的增强及降水凝结潜热的释放促使湿斜压性增强, 配合高层的强上升运动, 此时东北侧降水开始发展。28 日 13 时(图 6(b)), 东北侧暴雨中心高层的垂直上升运动有所减弱, 但 925 hPa~700 hPa 之间仍有 $MPV < 0$ 且 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \leq 0$ 的区域, 且湿位涡有所加强, 为暴雨的再次发展提供了有利的不稳定能量储备。西北侧暴雨中心在 600 hPa 以下存在对流不稳定层结($\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \leq 0$), 850 hPa 附近的 $MPV < 0$, 加上高层强上升运动的触发作用, 西北侧降水开始发展。28 日 18 时(图 6(c)), 尽管两个暴雨中心的低层仍残留 $MPV < 0$ 且 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \leq 0$ 的湿斜压不稳定区域, 但高层垂直上升运动中心的西移, 导致低层抬升强迫减弱, 无法有效将不稳定层结抬升至凝结高度以上, 上升运动动能衰减, 最终引发降水强度的减弱。



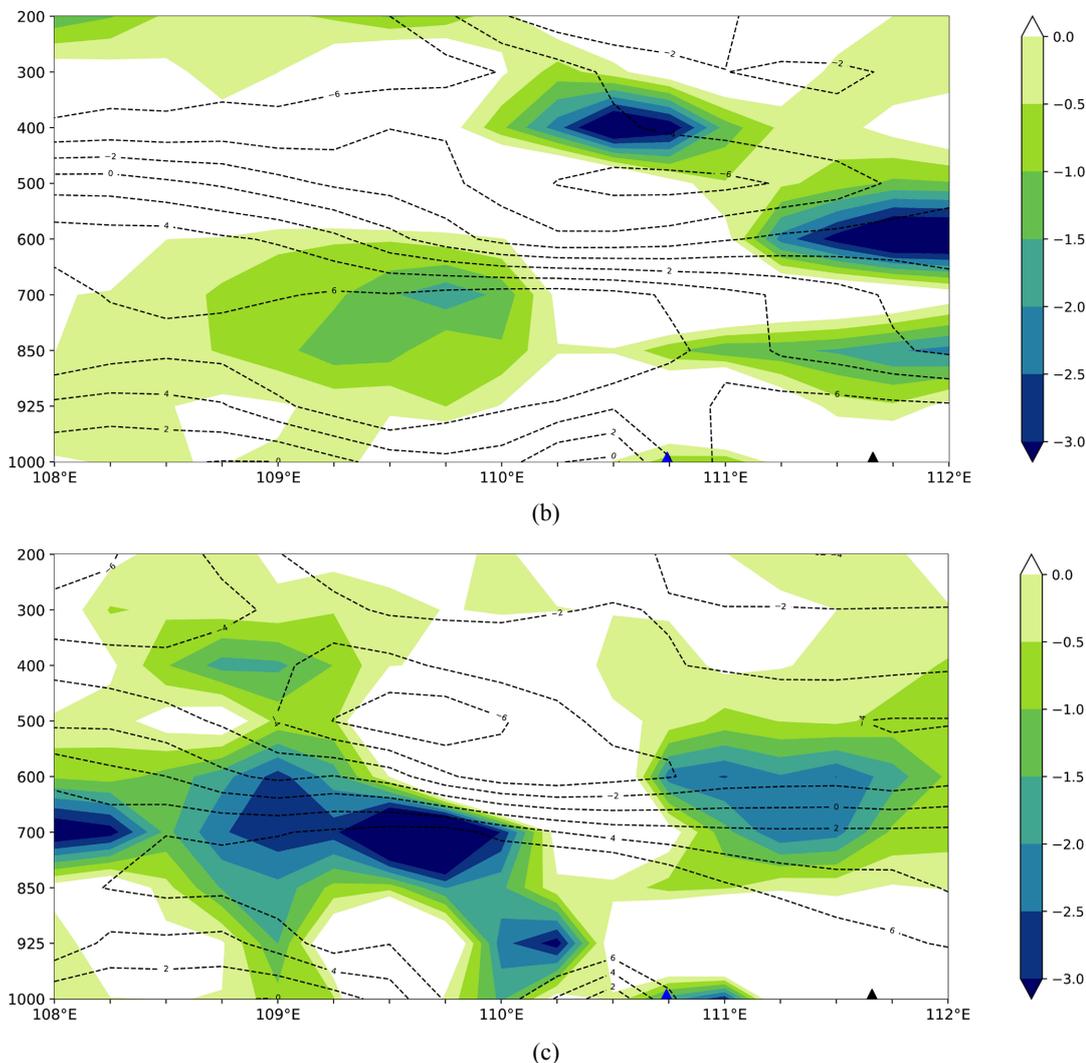


Figure 6. The vertical cross-section of moist potential vorticity (MPV, shaded with only negative values plotted, units: $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K} \cdot (\text{s} \cdot \text{kg})^{-1}$) and $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ (black dashed line, units: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$) at (a) 09:00 BT, (b) 13:00 BT and (c) 18:00 BT in 28 July

2024

图 6. 2024 年 7 月 28 日 (a) 09:00、(b) 13:00、(c) 18:00 湿位涡 MVP (填色, 仅给出负值, 单位: 单位 $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K} \cdot (\text{s} \cdot \text{kg})^{-1}$) 和 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ (黑色虚线, 单位: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 的垂直剖面图

6. 结论

本研究针对台风“格美”残余环流影响邵阳的暴雨过程, 结合动力与热力分析, 系统揭示了内陆山区台风暴雨的垂直运动结构、水汽配置及不稳定机制特征, 主要结论如下:

(1) 垂直运动的分层配置是降水强度与类型的关键控制因子。本次暴雨过程中, 邵阳地区呈现“高层强上升($< -2 \text{ Pa/s}$)、中层下沉、低层弱上升”的显著分层特征。其中, 东北部暴雨中心的高层强上升运动($< -2 \text{ Pa/s}$)与低层高湿($q > 15 \text{ g/kg}$)、高热力不稳定($\theta_{se} > 356 \text{ K}$)形成“燃料 - 动力”协同机制, 支撑持续性降水; 西北部暴雨中心依赖“下暖湿 - 上干冷”不稳定层结, 降水多以短时强降水为主, 降水持续时间较短。

(2) 水汽输送与辐合特征的差异主导了区域降水持续性。850 hPa 水汽输送通道长时间维持, 中心处水汽通量强度大于 $16 \text{ g}(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。东北部降水前 2~3 小时显著水汽辐合($-0.8 \times 10^{-6} \text{ g}(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)为其提供持续水汽输入, 西北部降水可能是通过局地边界层水汽抬升满足需求, 导致降水具有“短历时、强强度”的特点。

(3) 湿对称不稳定与对流触发的非对称性决定了降水类型的差异。东北部暴雨中心上空存在明显的湿对称不稳定($\text{MPV} < 0$ 且 $\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \leq 0$), 与高层强上升运动协同增强对流的有序组织, 形成持续性强降雨; 西北部暴雨中心仅表现为对流不稳定($\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \leq 0$), 缺乏湿对称不稳定的协同作用, 导致降水以短时强降雨为主。

本研究通过个例分析初步揭示了邵阳地区台风暴雨的动力热力机制, 但台风移动路径的多样性(如西北行、北翘、停滞等)可能导致不同区域降水特征存在差异。未来需拓展台风暴雨个例库, 系统对比不同移动路径台风影响下的垂直运动结构、水汽输送及不稳定机制, 进一步深化对台风暴雨形成机理的认知, 为邵阳地区台风暴雨精细化预报提供更全面的科学支撑。

参考文献

- [1] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 969-986.
- [2] 王海平, 向纯怡. 2024 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 2025, 45(3): 137-150.
- [3] 王凯, 齐铎, 高丽, 等. 浙东地形对台风“利奇马”极端降水的影响分析[J]. 气象科学, 2021, 41(2): 10.
- [4] Chen, L., Li, Y. and Cheng, Z. (2010) An Overview of Research and Forecasting on Rainfall Associated with Landfalling Tropical Cyclones. *Advances in Atmospheric Sciences*, **27**, 967-976. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-8171-y>
- [5] 李泽椿, 谌芸, 张芳华, 等. 由河南“75-8”特大暴雨引发的思考[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(3): 1-12.
- [6] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报, 2006, 64(1): 57-71.
- [7] Zhang, G., Mao, J., Hua, W., Wu, X., Sun, R., Yan, Z., *et al.* (2023) Synergistic Effect of the Planetary-Scale Disturbance, Typhoon and Meso- β -Scale Convective Vortex on the Extremely Intense Rainstorm on 20 July 2021 in Zhengzhou. *Advances in Atmospheric Sciences*, **40**, 428-446. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2189-9>
- [8] 丁一汇. 论河南“75-8”特大暴雨的研究: 回顾与评述[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 411-424.
- [9] 周毅, 赵磊刚, 李昉英. 台风暴雨过程中不同尺度系统的相互作用[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 8.
- [10] Rotunno, R. and Houze, R.A. (2007) Lessons on Orographic Precipitation from the Mesoscale Alpine Programme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **133**, 811-830. <https://doi.org/10.1002/qj.67>
- [11] Lin, Y., Zhao, M. and Zhang, M. (2015) Tropical Cyclone Rainfall Area Controlled by Relative Sea Surface Temperature. *Nature Communications*, **6**, Article No. 6591. <https://doi.org/10.1038/ncomms7591>
- [12] Lock, N.A. and Houston, A.L. (2014) Empirical Examination of the Factors Regulating Thunderstorm Initiation. *Monthly Weather Review*, **142**, 240-258. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-13-00082.1>