

台风“格美”倒槽雨带中“列车效应”的中尺度特征及成因分析

胡晓琳^{1,2}, 李君^{1,2*}, 周莉^{3,4}, 贾瑞^{1,2}, 李妍^{1,2}, 何康敏⁵

(1. 山东省防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省淄博市气象局, 山东 淄博 255048; 3. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410118; 4. 湖南省气象台, 湖南 长沙 410118; 5. 山东省沂源县气象局, 山东 淄博 256100)

摘 要: 利用雨滴谱、雷达、卫星等多种观测产品和ERA5再分析资料,对2024年第3号台风“格美”倒槽雨带中“列车效应”的中尺度特征及对流触发维持机制进行了诊断分析。结果表明:7月28日04:00—12:00,西风槽后中层冷空气与台风倒槽共同影响山东,低层偏南急流与东北风的切变在鲁中—山东半岛的西北部地区稳定维持,最终形成“列车效应”。“列车效应”影响期间,反射率因子大值区、云顶黑体亮度温度梯度大值区和短时强降水落区高度重合,强降水具有海洋型对流降水特征。“列车效应”强回波带的上游,即济宁、枣庄和临沂的交界处是回波快速增强区,对流单体的反射率因子迅速增大、回波中心高度快速升高且单体后向传播;强回波带的对流单体已发展到成熟阶段,回波中心高度和反射率因子强度变化不大。高温高湿区(假相当位温 ≥ 348 K)、水汽通量辐合线和整层水汽通量散度负值区一直位于列车线附近,充沛的水汽和能量配合稳定持续的强辐合作用是形成“列车效应”的重要因素。回波快速增强区的对流触发和维持机制不同,04:00—08:00台风倒槽顶端风场辐合触发条件对称不稳定,强辐合中心从低层倾斜向北发展到中层500 hPa;08:00—12:00地面冷池与低层暖湿空气对峙触发新对流,中层高位涡干冷空气侵入促使正涡度平流发展,较强的斜压性和正涡度平流的抽吸作用使得低层辐合上升,“列车效应”进一步加强。

关键词: 台风倒槽;“列车效应”;中层冷空气;冷池

中图分类号: P458.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)03-0066-16

0 引言

“列车效应”是一类引发强降水的组织化对流过程,其表现形式为多个对流单体像火车车厢一样连续不断地经过同一位置^[1]。当这种强降水发生在城市聚居地或者山地河谷等特殊地理区域,就会诱发城市内涝、中小河流泛滥以及山洪等多种灾害,进而造成人员伤亡和巨额财产损失。近年来,受气候变化和城市化进程加快的影响,由“列车效应”引起的极端降水事件更加频发,比如北京的“7·21”暴雨、河南的“21·7”特大暴雨、广西“23·6”热带低压暴

雨等^[2-4]。

多位学者对出现“列车效应”的暴雨过程进行天气学分析表明,稳定维持的副热带高压、高空槽或低涡、低空切变线以及低空急流等是引发“列车效应”的主要影响系统^[5-6]。产生“列车效应”的环境大气具有中等到弱的垂直风切变、抬升凝结高度或自由对流高度较低、对流抑制小、整层高湿以及暖云层厚度较大等特征^[7-9]。从雷达和卫星云图的分析可知,“列车效应”的对流云团具有中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)特征,带状回波稳定少动,雷暴后向传播,回波整体质心较低,

收稿日期: 2025-02-20。

基金项目: 山东省气象局重大天气过程专项(SDTQ2024-05);气象灾害预测预警与应急管理研究中心2025年自筹项目(ZHYJ25-ZC05);山东省气象局引导类项目(2022SDYD14);珠江流域(华南区域)气象科研开放基金项目(ZJLY202423-HU03);淮河流域气象开放研究基金(HRM202416)。

作者简介: 胡晓琳(1989-),女,工程师,硕士,主要从事灾害性天气中短期预报预警研究。E-mail: 414297035@qq.com

*通信作者: 李君(1968-),女,高级工程师,硕士,主要从事人工影响天气研究。E-mail: 810665680@qq.com

只有初始回波质心较高, Z_{DR} 、 K_{DP} 柱扩展至融化层高度以上, 底层有明显的 Z_{DR} 、 K_{DP} 大值区^[10-13]。梅雨锋附近“列车效应”受较强的低空急流影响, 径向速度具有特殊的“牛眼”结构^[14-15]。地形在“列车效应”的形成和维持过程中起到强迫抬升触发中小尺度对流系统、延缓冷空气影响维持不稳定层结、加强垂直运动等作用^[16-18]。

由台风引起的“列车效应”是造成局地特大暴雨的重要因素^[19-20]。尽管台风雨带存在多种不同的环流配置, 但当近地面的中尺度辐合线、切变线或者锋区与大尺度背景气流平行时, 便可触发新生对流, 从而形成“列车效应”。这些新生对流可由降水产生的冷池出流或者冷池与暖湿气流形成的中尺度锋区触发^[21-22], 可从沿海海面中尺度辐合带中形成, 沿辐合线向陆地移动和发展^[23], 还可由风场切变线及台风内核区的低空急流风速的脉动共同引起^[24]。除此之外, 干冷空气侵入引起锋生作用以及“喇叭口”等特殊地形的强迫抬升, 也是触发“列车效应”新生对流的重要原因^[25-27]。这些新生单体的合并加强以及山脉地形的阻挡使得台风雨带中的“列车效应”得以维持^[28]。

台风“格美”作为2024年首个超强台风, 致使华南和江南部分地区的降雨量突破历史极值。山东受台风“格美”影响也出现明显降水, 国家站的平均降水量为52.2 mm。降水分布不均, 超50 mm的强降水区域主要集中在黄河以南的鲁东南—山东半岛北部地区, 最大小时雨强为潍坊昌乐乔官站的69.5 mm, 最大过程降水量出现在淄博市博山区池上站(36.33°N, 118.05°E), 达282.5 mm。受“列车效应”的影响, 潍坊昌乐、寿光和青州站的日降水量分别为124.0 mm、128.4 mm、121.9 mm, 为本站7月历史第二多值, 持续不断的强降水引发当地出现不同程度的地质灾害。

尽管学者针对台风螺旋雨带中的“列车效应”已经开展了大量有意义的研究, 但目前对倒槽雨带顶端“列车效应”的中尺度特征及成因研究较少。本文将利用雨滴谱、雷达和卫星等多种观测产品以及最新的ERA5再分析资料, 详细研究台风“格美”倒槽雨带顶端“列车效应”的主要特征及形成原因, 为山东台风暴雨的精准预报预警、科学防范台风灾害提供理论依据和应用价值。

1 数据和方法

1.1 数据来源

文中使用的国家级和区域级地面加密自动站降水、新泰和沂源站的雨滴谱等观测资料均来自于“气象大数据云平台·天擎(山东)”系统(见图1, 网址: <http://10.76.90.120:8088/cmadaas>)。为了保证数据的准确性, 减少因自动站资料缺省等原因造成的影响, 本文对研究范围内的自动站资料进行了严格的质量控制和筛选。台风“格美”的路径资料来自于中国气象局热带气旋资料中心2024年CMA最佳路径数据集(网址: <https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj>)。FY_4B卫星以及潍坊和济宁双偏振多普勒雷达的基数据资料均由山东省气象局数据中心提供, 多普勒雷达大约每6 min体扫一次。为进一步研究台风“格美”造成“列车效应”的原因, 本文使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)开发的第五代再分析资料ERA5(网址: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>), 时间分辨率为1 h, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

1.2 湿位涡

条件对称不稳定的判据通常有两种: 一是基本气流的等绝对动量(M)面坡度大于等位温(θ)面坡度且小于等湿球位温(θ_w)、等相当位温(θ_e)或者等假相当位温(θ_{se})面坡度; 二是当大气垂直速度的水平变化比水平速度的垂直变化小得多时, 可利用湿位涡(Moist Potential Vorticity, M_{pv})进行诊断。

P 坐标系下的 M_{pv} 公式^[29]为:

$$M_{pv} = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \quad (1)$$

式中: θ_{se} 为假相当位温; g 为重力加速度; ζ 为相对涡度; f 为地转涡度; v 为风矢的 v 分量、 u 为风矢的 u 分量; 位涡单位为PVU($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/s}$)。

2 环流特征

2.1 台风“格美”概况

2024年第3号台风“格美”于7月25日19:50(北京时, 下同)以台风级在福建省莆田市秀屿区沿

海登陆,中心附近最大风力12级(风速33 m/s),中心最低气压972 hPa(见图1)。台风“格美”登陆后立刻减弱为强热带风暴,于26日17:00前后由福建省光泽县移入江西省境内并继续减弱为热带风暴。27日17:00从江西九江移入湖北境内,20:00强度减弱为热带低压,28日08:00停止编号,台风移动路径见图1。受不断加强的西太平洋副热带高压(简称副高)影响,减弱后的残余低压环流继续向西移动进入湖南。29日20:00,残余低压移出湖南,对山东的影响也基本结束。

2.2 环流形势

分析此次山东强降水的主要环流形势可见,7月26日20:00(见图2a),台风中心进入江西后,台风倒槽顶端开始影响山东。27日08:00(见图2b),500 hPa副高西北部的588 dagpm一直延伸至内陆,高压坝的阻挡迫使台风路径由西北向逐渐转为偏西向。山东一直处在200 hPa高空急流入口区的右侧和850 hPa低空东南急流的左前方,暴雨发

生在台风倒槽顶端时,高、低空急流耦合使上升运动增强,是山东暴雨增大的重要原因之一^[30]。

7月27日20:00起,中层有西风槽后的弱冷空气南下,与台风倒槽共同影响山东(见图2c)。28日08:00(见图2d),东南急流已经完全转为西南急流;西风槽前和倒槽东侧的正涡度平流叠加,使得低层辐合增强;槽后弱冷空气侵入倒槽,冷暖交汇触发不稳定能量释放^[31]。20:00(见图2e),500 hPa西风槽减弱北收,850 hPa切变线北推至鲁西北地区。至29日08:00(图略),副高进一步增强,山东全境被西南急流控制,降水北抬。

28日08:00(见图2f),强降水区附近的章丘探空显示,整层大气近于饱和和高湿状态,暖云层较厚。环境温度直减率接近且略大于湿绝热递减率,条件不稳定性较弱。对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)代表性不佳,仅为148.7 J/kg。0~6 km的垂直风切变较弱,为7.2 m/s。但600~500 hPa为西北风,K指数高达41.7℃,说明有冷空气从中层侵入。

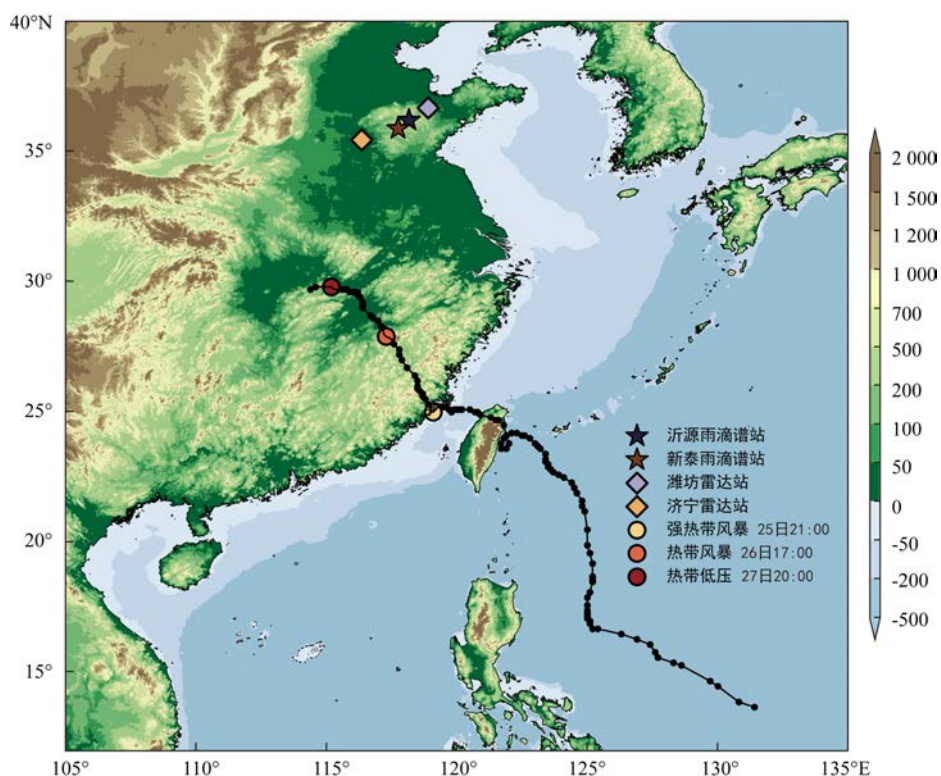


图1 2024年第3号台风“格美”移动路径(黑色点线)及地形(填色,单位:m)

Fig.1 The track of Typhoon "Gemei" No.3 in 2024 (black dotted line) and topography (colored, unit: m)

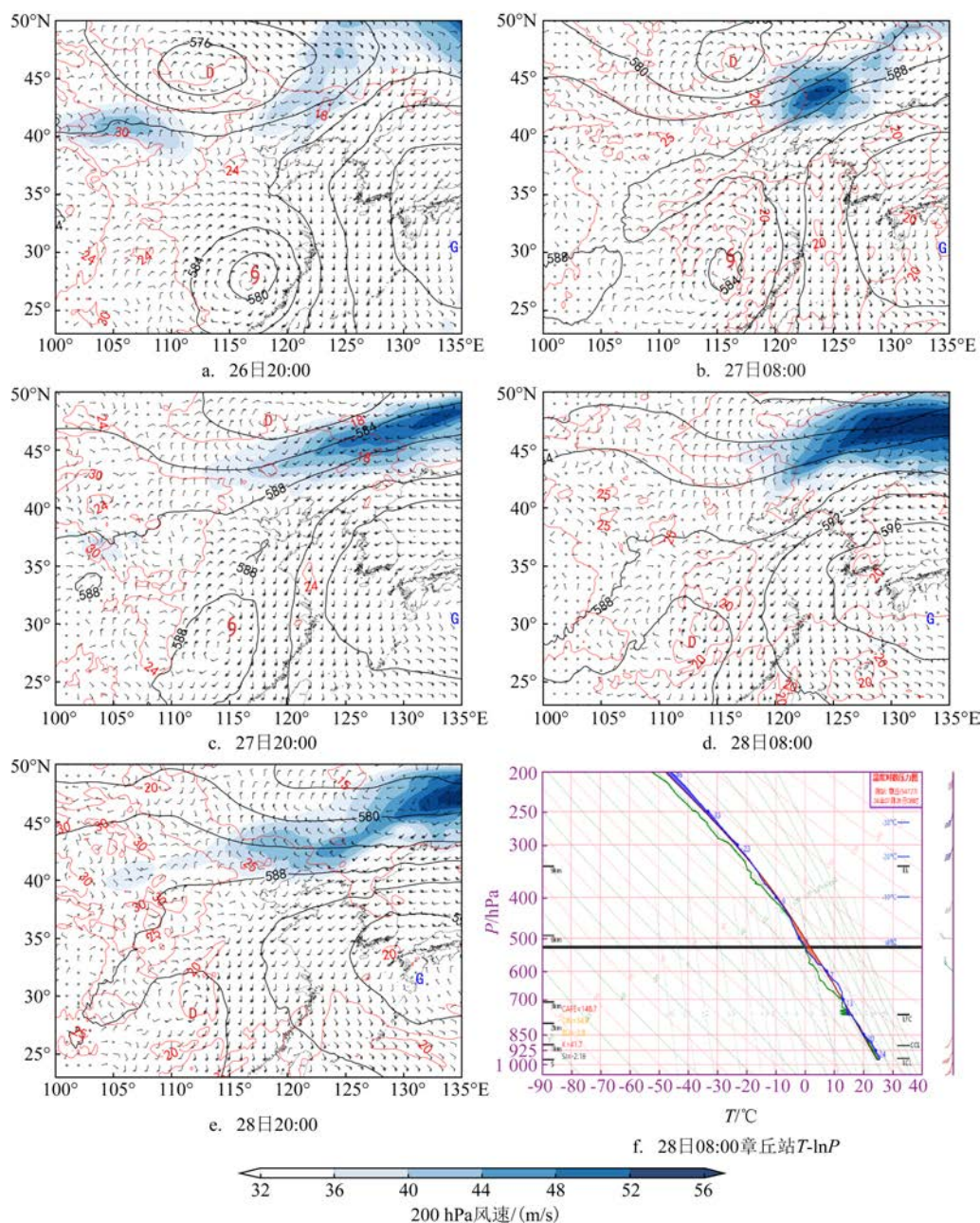


图2 2024年7月26—28日环流形势以及28日08:00章丘站的T-lnP图

Fig.2 The circulation pattern from July 26 to 28, 2024, and the T-lnP diagram of Zhangqiu station at 08:00 on the 28th

2.3 山东降水特征

台风“格美”对山东的主要影响时间为7月26日20:00—28日20:00。从日降水量来看,27日(实际指26日20:00—27日20:00,以此类推)受台风倒槽影响,强降水主要集中在倒槽东侧的鲁东南、鲁中东部以及半岛的西北部地区,共有316个站点的

降水超过50 mm,29个站点超过100 mm(见图3a);28日强降水继续向北发展,呈东北—西南向的带状分布,超过100 mm的站点明显增加,达129个,分布范围自鲁中持续延伸至半岛的西北部(见图3b)。

从出现最大过程降水量的博山池上站的逐时雨量可以看出(见图3c),降水主要出现在西风槽与台风倒槽共同影响的28日(阴影区),博山池上站在

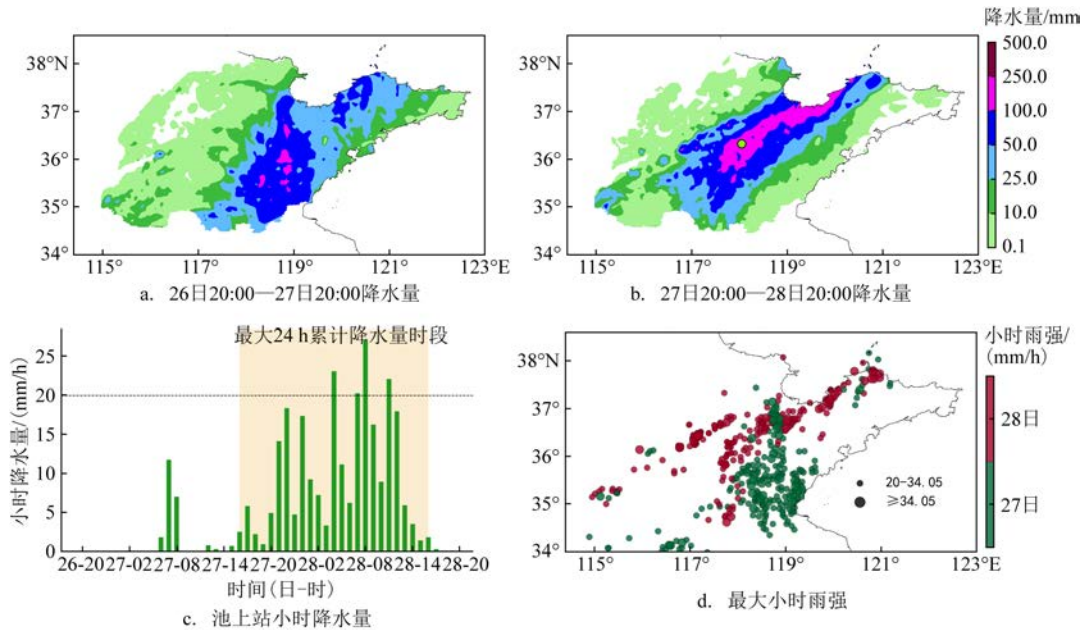


图3 24 h累计降水量和最大小时雨强的空间分布以及池上站小时降水量时间变化

Fig.3 Spatial distribution of 24-hour accumulated precipitation and maximum hourly rainfall intensity, and the temporal variation of hourly precipitation at Chishang Station

该时段的24 h累计降水量达256.1 mm,为特大暴雨。从27日和28日最大小时雨强的空间分布来看(见图3d),超过20 mm的短时强降水^[32]与当日的暴雨区分布重合,仅有18%的站点的最大小时雨强超过黄钰婧等^[33]定义的环渤海地区台风极端小时降水阈值34.05 mm。因此,此次强降水以混合型为主,持续时间较长对强降水的形成起到关键作用。

综合来看,27—28日副高稳定少动,中纬度西风槽东移缓慢,低层偏南风与东北风在鲁西南至渤海一线的切变线维持超过24 h。这种环流形势的稳定维持不仅有利于暖湿气流的持续输送和不稳定能量的积聚,还为MCS的形成提供了有利条件。

3 台风“格美”的“列车效应”中尺度特征

MCS一般都是由多个中小尺度系统组织化而成的。因此,本文将利用雷达、卫星和雨滴谱资料对中小尺度系统的发生发展开展进一步分析。利用FY_4B的云顶黑体亮度温度(Temperature of

Brightness Blackbody, TBB)资料和雷达组合反射率因子综合分析可知,MCS发展阶段(27日20:00—28日04:00,图略),苏鲁边界不断有对流云生成加强并向东北方向移动,形成逐渐北抬的线状对流回波,最终组织化为水平伸展超200 km、组合反射率 ≥ 50 dBZ的MCS。28日04:00起的9 h内,一条西南—东北走向的MCS带状回波位置几乎不变,多个对流单体连续不断经过同一位置,属于典型的“列车效应”^[4]。

综合组合反射率、TBB和未来1 h短时强降水位置,将“列车效应”的影响时间大致划分为第一阶段的28日04:00—08:00(见图4a—4d)和第二阶段的08:00—12:00(见图4e—4i)。第一阶段中,“列车效应”强回波带的西南端出现一个TBB ≤ -62 °C的对流云团,多条反射率因子大值回波带被层状云降水回波包裹(见图4a、4b)。当对流云团合并入MCS带状回波后,反射率因子大值区的位置逐渐由TBB ≤ -62 °C的低值中心转移到梯度大值区,层状云降水回波也由包裹反射率因子大值区逐渐转移到其西北侧,未来1 h的短时强降水出现在反射率因子和TBB梯度大值区重合的位置(见图4c、4d)。第二阶段中,“列车效应”强回波带的西南端又出现一个

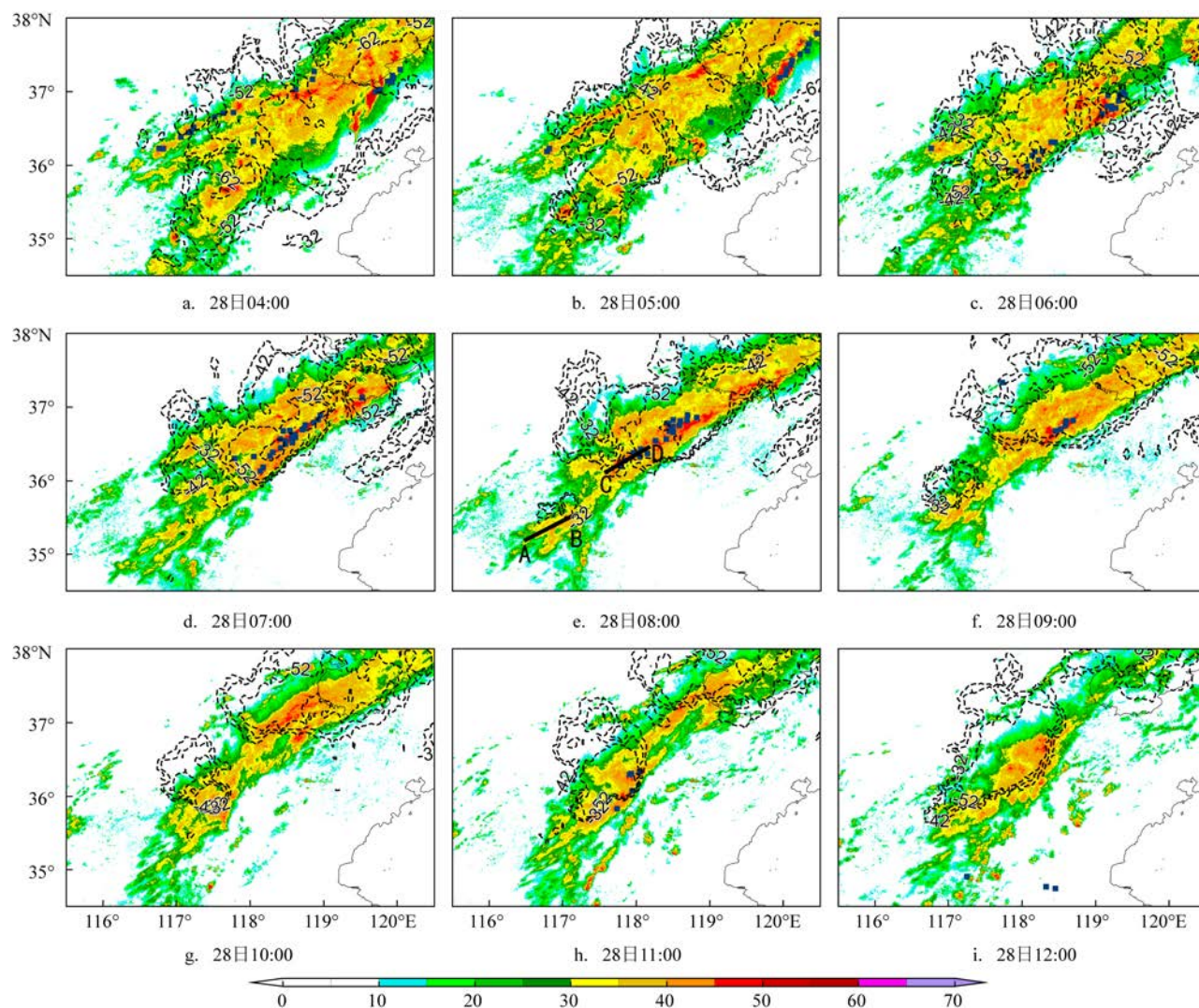


图4 2024年7月28日济宁和潍坊组合反射率拼图(填色,单位:dBZ)、TBB(黑线,单位:℃)和未来1 h降水量大于20 mm的站点(蓝色散点,单位:mm/h)

Fig.4 The composite reflectivity mosaic of Jining and Weifang (colored, unit: dBZ), TBB(black line, unit: ℃), and the stations with precipitation exceeding 20 mm in the next hour (blue dots, unit: mm/h) on July 28, 2024

TBB $\leq$ -42 ℃的对流云团,该对流云团沿“列车线”向东北方向移动的过程中逐渐发展(见图4e—4g)。11:00(见图4h),该对流云团的TBB梯度大值区和反射率因子大值区在鲁中地区再度重合,重合区在未来1 h出现短时强降水。与第一阶段不同的是该对流云团只是发展移动,并没有合并入第一阶段的对流云中。12:00(见图4i)之后,TBB $\leq$ -52 ℃的对流云团面积减小,对流减弱,层状云回波结构松散且出现断裂,“列车效应”基本结束。郑丽娜等^[34]将泰山地区引起暴雨的MCS组织形态分为6类,第一阶段的雷达回波和TBB特征表现为从镶嵌在层状云

降水内的多条对流带(EL₂)型向一条对流带(EL₁)型演变,第二阶段的对流回波结构则是EL₁型的重建。

选取两个阶段的主要影响站点沂源站和新泰站(见图5),其分钟降水和雨滴谱观测值均随时间有明显变化。第一阶段,沂源站的分钟降水观测具有显著对流性增强的特征(见图5a),06:28—08:00出现降水脉动,分钟降水强度峰值达1.1 mm。同阶段雨滴谱的粒子直径(见图5b)和速度(见图5c)的数浓度观测结果显示,大部分粒子直径都在4 mm以下,1~2 mm的粒子数浓度高,粒子速度主要集中在4~6 m/s,最大粒子速度超过10 m/s。降水脉动增

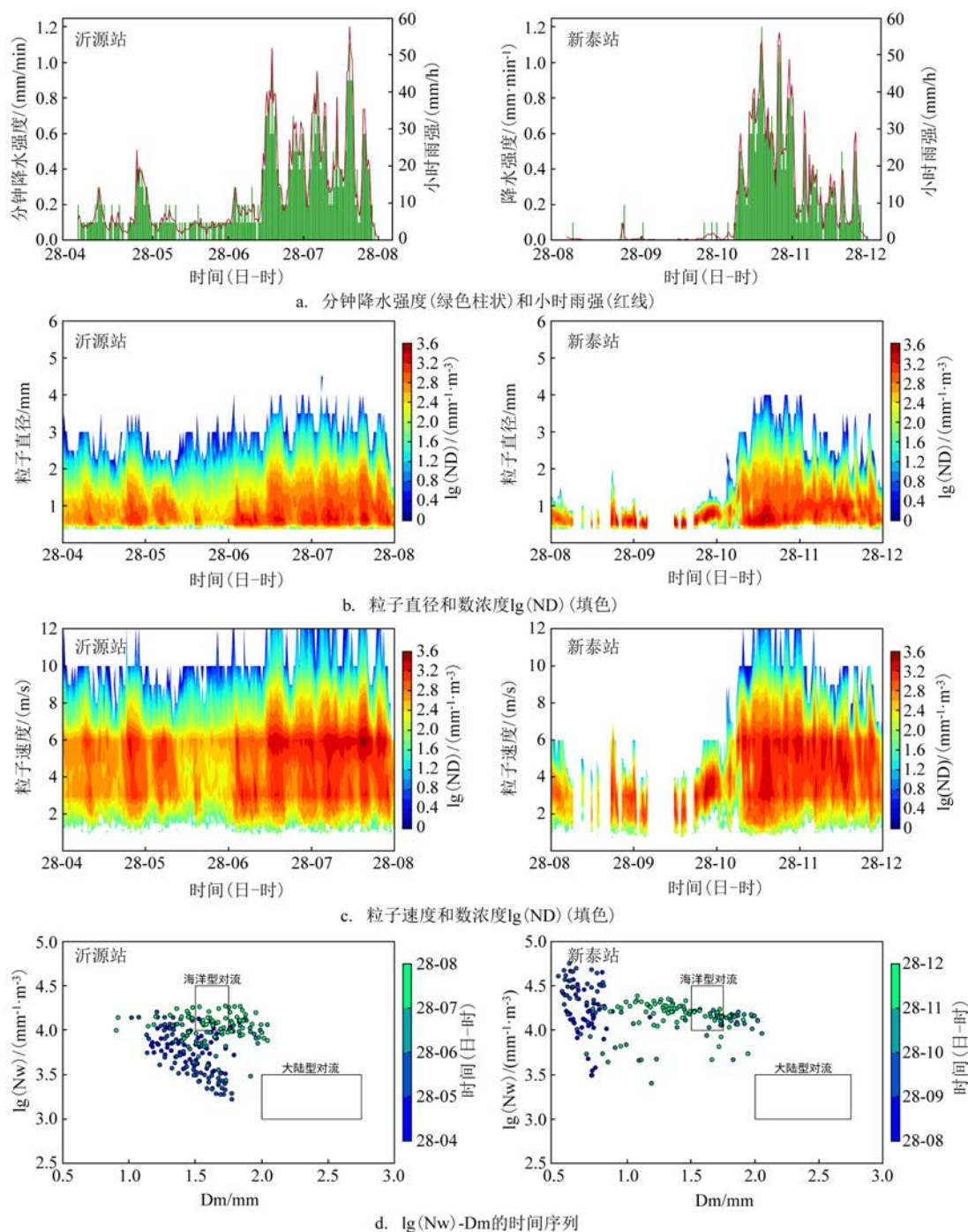


图5 2024年7月28日沂源站和新泰站雨滴谱

Fig.5 Drop size distributions at Yiyuan Station and Xintai Station on July 28, 2024

强时,粒子直径和速度谱宽变化不大, $\lg\text{ND}$ 由3/ $(\text{mm}\cdot\text{m}^{-3})$ 以下迅速增长到3.6/ $(\text{mm}\cdot\text{m}^{-3})$,表明沂源站由层状云降水转为对流性降水^[35]。 $\lg\text{Nw}$ -Dm的时间序列显示(见图5d),06:00—08:00降水脉动增强时出现海洋型对流降水的特点^[36]。图2f显示整个对

流层都是近乎饱和的状态,深厚的湿层有利于海洋型降水出现^[37]。

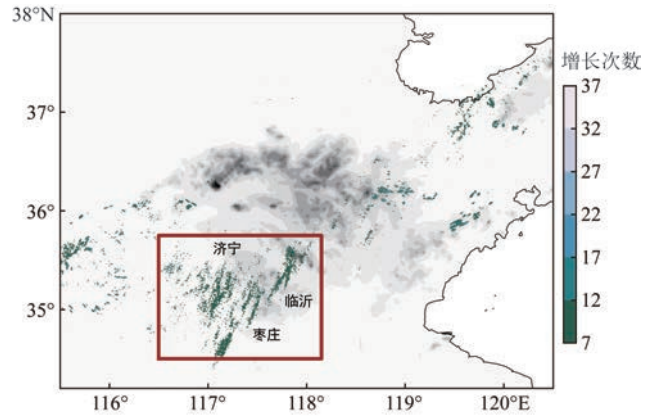
对比沂源站,第二阶段的主要影响站点新泰站(见图5a)的分钟降水还具有显著的阵性特点。10:15出现对流时,分钟降水强度迅速增大,峰值达

1.2 mm,降水粒子的直径(见图5b)和速度(见图5c)的谱宽同步增长,两者的lgND迅速增强到 $3.6/(\text{mm}\cdot\text{m}^3)$,与第一阶段降水脉动时的沂源站接近。新泰站的lgNw-Dm时间序列(见图5d)也表现出海洋型对流降水的特征。这种Nw值高、Dm值低的特征与较高的大气气溶胶和水汽含量有关,充足的水汽供应会导致雨滴浓度较高、雨滴直径较小^[38]。

为了更好地分析“列车效应”源头对流发生发展及增强的机制,利用济宁站和潍坊站的雷达回波反射率因子拼图,假定每时次反射率因子比上一时次的增长量超过10 dBZ,就记为1次增长。对7月28日03:00—12:00每个格点的增长次数进行统计,得到雷达回波快速增强频次分布图。由图6可见,济宁、枣庄和临沂的交界处是回波快速增强的主要区域。郑丽娜等^[34]研究发现,泰山地区向东北方向移动的EL₁型和EL₂型回波系统的产生源地位于泰山西南方向,与本研究结果十分相近但略偏西。与图4对比可以看出,回波快速增强区位于“列车效应”强回波带的上游,而强回波带的位置并没有出现多频次的快速增强。这可能是因为“列车效应”强回波带的对流已经发展到成熟阶段,大范围的持续降水抑制了回波发展^[23]。对流快速增强区域内还出现了条状回波增强轨迹,表明该区域可能存在中尺度发展特性的多条对流云带。

选取28日08:00,沿“列车效应”强回波带的主

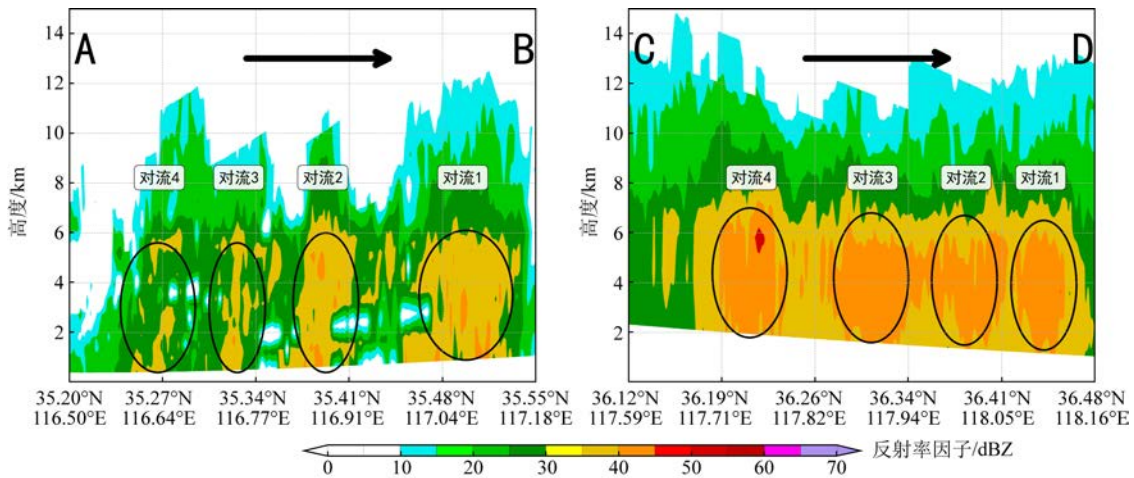
轴绘制反射率因子剖面图(见图7),剖面位置分别对应回波快速增强区域A—B和对流成熟区域C—D,即图4e中黑线标注位置。A—B段对流呈现新生发展特征(见图7a),反射率因子由30 dBZ以下快速增强到40~45 dBZ,回波中心高度从2 km抬升到4 km。因此,新对流单体在“列车效应”主轴西南象限不断生成,生成后受西南向引导气流作用自西南向东北方向移动。对流新生方向与传播方向相反,具备典



注:红框为快速增强区;灰色阴影区海拔超100 m

图6 2024年7月28日03:00—12:00雷达回波快速增强频次分布及地形

Fig.6 The distribution map of rapid radar echo enhancement frequency from 03:00 to 12:00 on July 28, 2024 and topography



注:黑色箭头为“列车效应”移动方向

图7 2024年7月28日08:00沿图4e中黑线A—B段(a)、C—D段(b)的反射率因子剖面图

Fig.7 The reflectivity factor cross-section profile along the black line segments A—B (a) and C—D (b) in Fig.4e on July 28, 2024, at 08:00

型的后向传播特征^[15]。相较于A—B段,对流成熟的C—D段的回波高度明显抬升(见图7b),中心高度升至6 km,反射率因子增大到50 dBZ。这说明A—B段生成的对流单体在向东北方向移动过程中仍可继续发展加强,但其增长速度远低于A—B段的新生对流。对流成熟的C—D段内,4个对流单体的反射率因子和回波高度几乎无变化,中心强度甚至略有减弱,这与对流成熟区并非对流快速增强区的结论相呼应。

“列车效应”过程中,多个强度超40 dBZ的强对流单体接连影响鲁中地区,最终导致该地区出现特大暴雨。基于此进一步探讨:为何济宁、枣庄和临沂三地交界处成为此次“列车效应”的对流源头?源头生成的对流单体为何能维持西南—东北向列

车线稳定存续长达9 h? 下文针对此次“列车效应”的成因进行详细分析。

4 “列车效应”成因诊断

4.1 “列车效应”的维持

在中纬度地区,整层水汽通量常被用来研究强降水的水汽来源,长时间持续性强降水过程往往伴有稳定持续的水汽输送^[39]。7月28日整层水汽通量矢量场表明,来自南海的西南水汽与来自太平洋的东南水汽在华南地区汇合,在西侧台风“格美”残涡和东侧副高的共同作用下,形成一条深厚的西南水汽通道,且一直延伸到东北地区,10 kg/(m·s)的水汽通量高值中心稳定维持。02:00(见图8a),鲁西

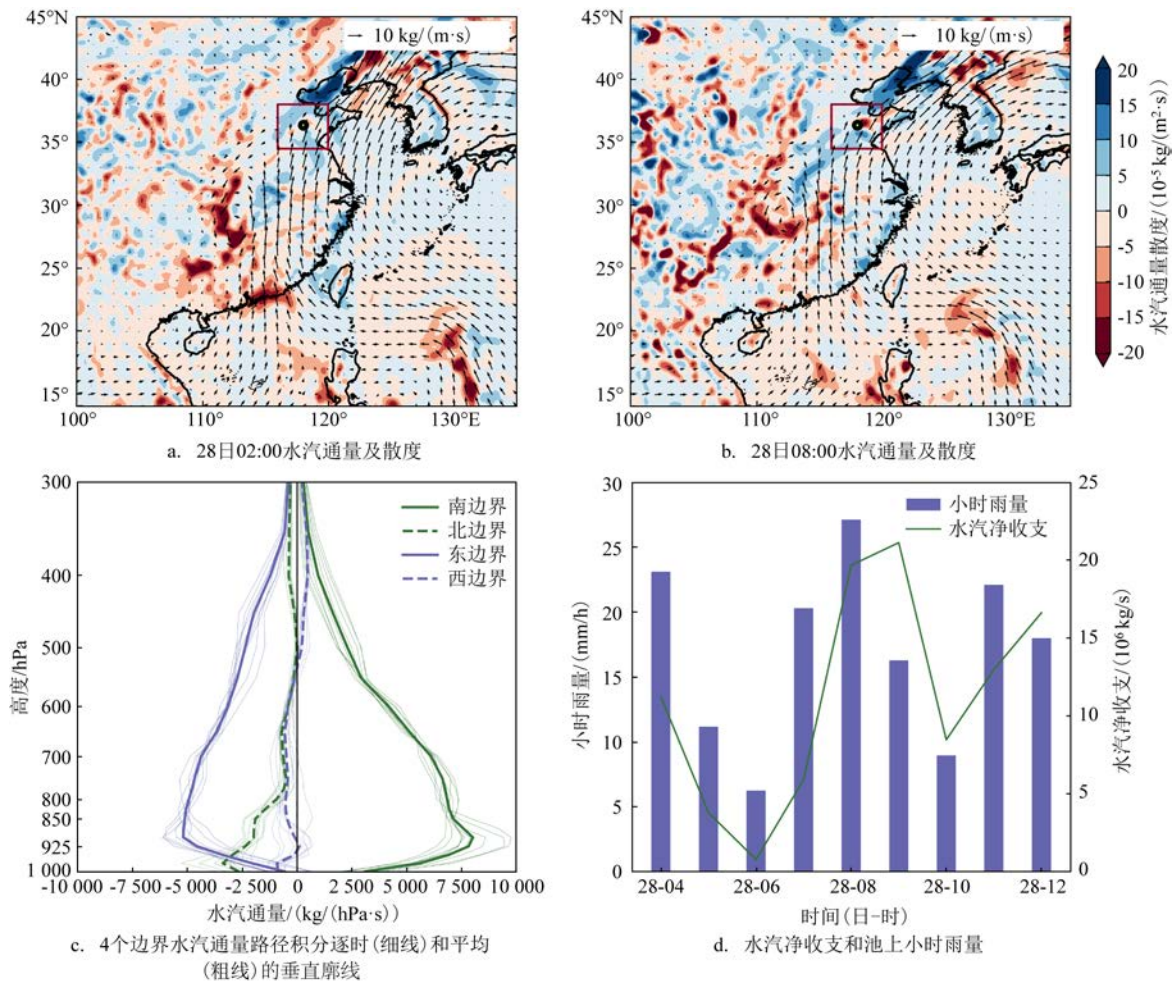


图8 2024年7月28日整层水汽通量及散度以及“列车效应”影响期间的水汽收支

Fig.8 Vertically integrated water vapor flux and its divergence on July 28, 2024, and the moisture budget during the "train effect" period

南—渤海一带的西南水汽输送强度迅速减小,形成西南—东北走向的水汽辐合线,辐合线沿线对应整层水汽通量散度负值带,水汽辐合带附近的带状上升运动区,与后续“列车效应”的强回波位置相一致。08:00(见图8b), $10\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 的水汽通量大值区和西南—东北向水汽通量辐合线稳定维持,整层水汽通量散度负值强度增强到 $-20\times 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,强水汽辐合中心移至鲁中地区,整层水汽通量散度负值区与未来1 h的短时强降水落区(见图4e)重合,引发第二阶段持续强降水。

利用水汽收支箱体模型^[40],沿图8a红色矩形东西、南北边界水汽通量进行积分并绘制垂直廓线(见图8c),结果表明:“列车效应”活跃期间(04:00—12:00),研究区整层水汽输入均来自于南边界,东边界水汽输出最强,西、北边界水汽通量十分微弱;南、东边界水汽通量高值中心均集中在925 Pa附近。通过计算箱体区域总水汽收支时序变化(见图8d)可知,研究区“箱体”位置始终存在水汽积累,水汽收入峰值出现时段与博山池上站短时强降水爆发时间近乎同步。持续性“列车效应”降水离不开充沛水汽的持续输送,整层水汽通量散度负值区稳定维持,是造成局地极端降水的重要原因之一^[41]。

4.2 “列车效应”源头对流触发机制

28日,随着线状对流回波逐渐北抬, 35°N 以南

沿海地区降水结束,地面气温受东南暖湿气流的影响升至 $28\sim 30^{\circ}\text{C}$;鲁中地区降水已持续近12 h,形成气温低于 26°C 的冷池。从28日04:00第一阶段扰动温度的分布(见图9a)来看^[24],济宁、枣庄和临沂交界处的回波快速增强区存在东西走向的中尺度温度锋区,锋区两侧温差约 3°C 。与此同时,该回波快速增强区位于台风倒槽的顶端,东南风与东北风交汇形成低层辐合(见图9a黑线)。28日08:00第二阶段(见图9b),第一阶段生成的对流在鲁中地区持续发展。鲁中持续的强降水使得回波快速增强区内中尺度温度锋区明显增强,锋区温差达到 6°C 左右。伴随台风倒槽东移, 35°N 以南地区全部转为偏南风,其与鲁中地区冷池流出产生的东北风在回波快速增强区附近交汇,使得地面辐合得以维持(见图9b黑线)。

上述事实表明,“列车效应”第一阶段在台风倒槽顶端的风场辐合作用下,济宁、枣庄和临沂交界的回波快速增强区不断触发新生对流并发展增强;第二阶段受长时间降水形成的冷池影响,冷池流出的东北风与倒槽东侧偏南风构建稳定的地面辐合线,在回波快速增强区附近触发大气不稳定能量释放,进一步提升了对流组织化发展程度。

假相当位温(θ_{se})能够表征大气温度和湿度参数特征,其高值中心及变化趋势对强降水的落区和发展有明显的指示意义。大气对流不稳定是对流系

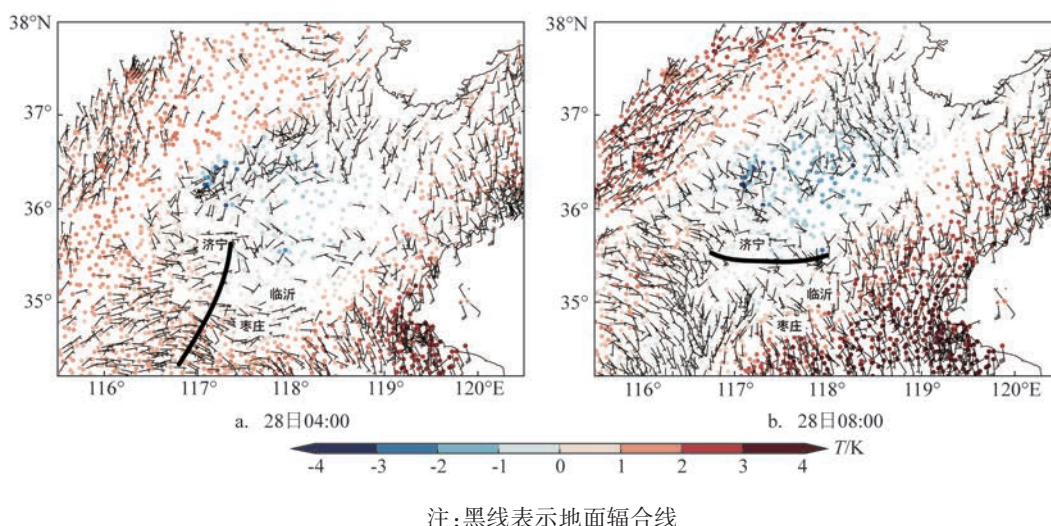


图9 2024年7月28日扰动温度(圆点,单位:K)和地面加密自动观测站风场(风矢,单位:m/s)

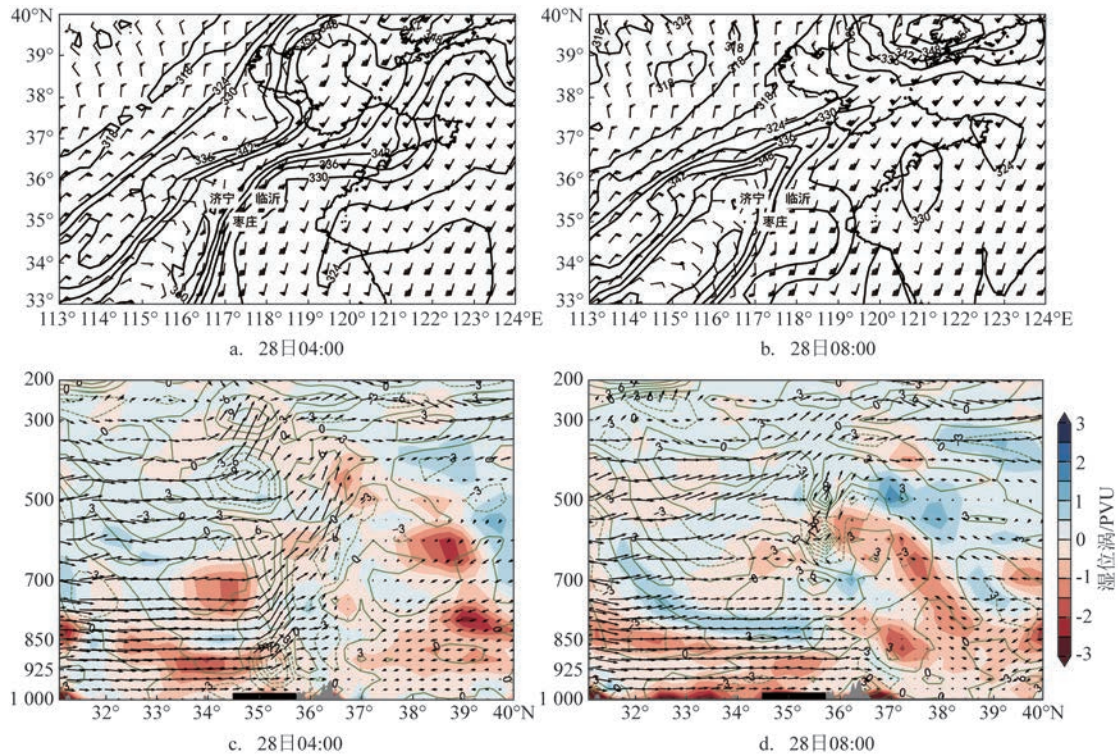
Fig.9 Perturbation temperature (dots, unit: K) and surface dense automatic weather station wind field (wind vectors, unit: m/s) on July 28 2024

统发生发展的重要条件之一,湿位涡(M_{pv})在绝热湿大气过程中具有守恒性,当 $M_{pv} < 0$ 时,表明大气存在条件对称不稳定特征^[42]。

从28日04:00的700 hPa的 θ_{se} 和500 hPa风场分布可以看出(见图10a),持续深厚的西南水汽通道不断向山东上空输送水汽和能量,使得700 hPa的高温高湿大值区($\theta_{se} \geq 348$ K)一直延伸到渤海, θ_{se} 中心值最高可达360 K。沿济宁、枣庄和临沂交界处的回波快速增强区中心117°E经线,绘制湿位涡、散度和风场(v 和扩大100倍的 w 合成值)的经向剖面显示(见图10c),低层925 hPa高度上,回波快速增强区上游34°N附近的 M_{pv} 中心值超过-2 PVU,说明此区域存在条件对称不稳定;925 hPa高度回波增强区内的负散度中心达 $-15 \times 10^{-5}/s$,低层强辐合触发不稳定能量释放,上升气流产生并倾斜向北发展,辐合中心一直伸展到500 hPa。回波快速增强区不断激发生成新对流单体,其在500 hPa西南气流

引导下向东北方向移动发展;强降水过程中的水汽相变释放大量凝结潜热,使得“列车效应”第一阶段强回波区(见图4a)与700 hPa高温高湿大值区近乎重合^[43],也为第二阶段降水过程提供热力正反馈^[44]。

在28日08:00“列车效应”的第二阶段(见图10b),鲁中—山东半岛北部地区的大气不稳定能量有所减弱,回波快速增强区位于 θ_{se} 高能舌的顶端,表明该区域水汽和能量最为集中。 θ_{se} 水平梯度大值区代表冷暖空气交汇界面,高能舌北侧 θ_{se} 梯度较04:00明显增大,说明中层干冷空气侵入与低层暖湿气流北上的对峙增强,较强大气斜压性有利于该区域新生对流发展^[45]。沿117°E的湿位涡、散度和风场的经向剖面可以看到(见图10d),第二阶段回波快速增强区低层盛行偏南风,维持 M_{pv} 负值不稳定特征;700~500 hPa存在2 PVU的偏北气流向南输送,叠加于低层暖湿气流上,使得回波快速增强区上空维持弱条件对称不稳定状态。此时强度达



注:700 hPa假相当位温(黑线,单位:K),500 hPa风场(风矢,单位:m/s),湿位温(填色,单位:PVU),散度(绿线,单位: $10^{-5}/s$),风场(V 和扩大100倍的 W 合成),——为回波快速增强区

图10 2024年7月28日假相当位温、风场(a,b)以及沿117°E的湿位涡、散度和合成风场(c,d)的经向剖面

Fig.10 Pseudo-equivalent potential temperature and wind field (a,b) on July 28, 2024, and meridional cross-sections of moist potential vorticity, divergence, and composite wind field (c,d) along 117°E

$-21 \times 10^{-5} \text{ s}$ 的强辐合中心在600 hPa以上产生上升运动,高位涡干冷空气侵入下沉,600 hPa以下区域出现下沉运动。高位涡气块下沉运动有利于局地正涡度平流发展,正涡度平流产生的抽吸作用使得低层辐合上升,对流得以发展^[46]。

5 结论

2024年7月27—28日,受第3号台风“格美”倒槽和西风槽的共同影响,山东出现局地性极端强降水。本文利用雨滴谱、雷达、卫星和ERA5再分析资料对此次强降水的中尺度特征进行分析,重点诊断台风雨带中“列车效应”的对流触发及维持机制。主要结论如下:

①27日山东主要受台风倒槽顶端环流影响,强降水主要出现在台风倒槽东侧;28日西太平洋副高和西风槽稳定少动,槽后中层冷空气与台风倒槽共同影响山东,偏南风与东北风构成的风场切变线一直维持在鲁中—山东半岛西北部,形成“列车效应”降水形态,强降水呈东北—西南向带状分布,长时间维持稳定是此次强降水形成的关键因素。

②结合组合反射率、TBB和未来1 h短时强降水实况,将7月28日04:00—12:00的“列车效应”划分为两个阶段。两个阶段内鲁中地区均出现反射率因子大值区与TBB梯度大值区高度重合的特征,未来1 h的短时强降水出现在二者重叠区域附近;雨滴谱资料显示两阶段降水都具有显著的海洋型对流降水的特点;济宁、枣庄和临沂的交界处为回波快速增强区,位于“列车效应”强回波带上游,具备反射率因子迅速增大、回波中心高度快速抬升和对流单体后向传播的特征;而“列车效应”强回波带内对流单体已经发展到成熟阶段,回波中心高度和雷达反射率强度几乎无变化。

③“列车效应”影响期间,来自南海和太平洋的低空急流不断向山东输送水汽和能量,高温高湿区($\theta_{se} \geq 348 \text{ K}$)、水汽通量辐合线和整层水汽通量散度负值区一直位于对流“列车线”附近。充沛的水汽和能量供给叠加稳定持续的强辐合条件,使得此次“列车效应”维持长达9 h,是山东局地出现极端强降水的重要原因。

④济宁、枣庄和临沂的交界处是此次“列车效

应”的对流源头,该区域对流触发和维持机制为:第一阶段,该区域位于台风倒槽的顶端,东南风和东北风形成风场辐合触发条件对称不稳定,上升气流产生并倾斜向北发展,强辐合从低层925 hPa一直伸展到500 hPa;第二阶段,前期强降水形成的地面冷池与低层暖湿空气对峙,触发新生对流,同时中层高位涡干冷空气南下侵入叠加低层暖湿空气,促使局地正涡度平流发展,较强的大气斜压性和正涡度平流抽吸作用使得低层辐合上升,进一步加强对流组织化发展。

本文通过综合分析台风“格美”影响下山东局地性极端强降水的特征及成因,揭示了水汽输送和强辐合的维持、中层冷空气侵入增强辐合作用、低层暖湿空气和地面冷池激发新生对流等因子对“列车效应”降水系统的影响机制。但针对地形对此次“列车效应”维持和增强的定量诊断,后续仍需要进一步探究。

参考文献:

- [1] DOSWELL C A, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(4): 560-581.
- [2] 周玉淑, 刘璐, 朱科锋, 等. 北京“7.21”特大暴雨过程中尺度系统的模拟及演变特征分析[J]. *大气科学*, 2014, 38(5): 885-896.
ZHOU Y S, LIU L, ZHU K F, et al. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 885-896.
- [3] 李国翠, 铃伟妙, 车少静, 等. “21·7”特大暴雨系统北上引发太行山中段区域大暴雨成因分析[J]. *高原气象*, 2023, 42(5): 1260-1270.
LI G C, QIAN W M, CHE S J, et al. Characteristics and synoptic analysis of a regional heavy rain in middle part of Taihang mountains caused by “21·7” torrential rain system moving northward[J]. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(5): 1260-1270.
- [4] 覃皓, 农孟松, 翟丽萍, 等. 广西沿海“23.6”弱热带低压破纪录暴雨过程的诊断分析[J]. *气象学报*, 2024, 82(3): 289-305.
QIN H, NONG M S, ZHAI L P, et al. Diagnosis of the June 2023 record-breaking rainstorm caused by a weak tropical depression in the coastal area of Guangxi, China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2024, 82(3): 289-305.
- [5] 雷蕾, 邢楠, 周璇, 等. 2018年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. *气象学报*, 2020, 78(1): 1-17.
LEI L, XING N, ZHOU X, et al. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing area[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(1): 1-17.

- [6] 黄晓璐, 李瑞青, 李林惠, 等. 内蒙古河套地区一次对流暴雨的中尺度对流系统演变特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1728-1738.
HUANG X L, LI R Q, LI L H, et al. Various characteristics of the mesoscale convection system of a convective rainstorm in the Hetao area of Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1728-1738.
- [7] 王华, 李宏宇, 仲路芹, 等. 京津冀一次罕见的双雨带暴雨过程成因分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 856-871.
WANG H, LI H Y, ZHONG J Q, et al. The formation of an unusual two-belt heavy rainfall around Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(4): 856-871.
- [8] 张芳, 张芳华, 张恒德, 等. 长江中下游一次暖区极端致洪暴雨特征及天气学成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 16-24.
ZHANG F, ZHANG F H, ZHANG H D, et al. Characteristics and synoptic causes of the extreme warm-region flood-causing rainfall over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 16-24.
- [9] 张兰, 陈炳洪, 张东, 等. 华南前汛期一次锋前暖区暴雨成因及中尺度对流系统分析[J]. 热带气象学报, 2023, 39(5): 697-710.
ZHANG L, CHEN B H, ZHANG D, et al. Analysis of causation and the meso-scale convective systems in a strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2023, 39(5): 697-710.
- [10] PETERS J M, SCHUMACHER R S. Mechanisms for organization and echo training in a flash-flood-producing mesoscale convective system[J]. Monthly Weather Review, 2015, 143(4): 1058-1085.
- [11] 范元月, 罗剑琴, 张家国, 等. 宜昌极端短时强降水中尺度对流系统特征分析[J]. 气象, 2020, 46(6): 776-791.
FAN Y Y, LUO J Q, ZHANG J G, et al. Characteristics analysis of mesoscale convective system causing the extreme flash rain in Yichang[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(6): 776-791.
- [12] 杨晓军, 叶培龙, 徐丽丽, 等. 一次青藏高原东北侧边强对流暴雨的中尺度对流系统演变特征[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 839-849.
YANG X J, YE P L, XU L L, et al. The variation characteristics of mesoscale convection system in a severe convective torrential rain over the northeast slope of the Qinghai-Xizang plateau[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 839-849.
- [13] 唐明晖, 付炜, 罗源, 等. 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, 2024, 40(4): 623-632.
TANG M H, FU W, LUO Y, et al. Analysis of dual polarization and wind field inversion characteristics of a heavy rainstorm in Changsha[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2024, 40(4): 623-632.
- [14] 孙素琴, 郑婧, 支树林, 等. 一次由“列车效应”引发的梅雨锋暴雨研究[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 190-201.
SUN S Q, ZHEN J, ZHI S L, et al. Analysis of a Mei-yu-Front rainstorm caused by 'train effect' [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 190-201.
- [15] 苟阿宁, 王玉娟, 张家国, 等. 一次梅雨锋附近“列车效应”致灾大暴雨过程观测分析[J]. 气象, 2019, 45(8): 1052-1064.
GOU A N, WANG Y J, ZHANG J G, et al. Analysis on heavy rainfall event caused by "train effect" in a Mei-yu front of Hubei Province[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(8): 1052-1064.
- [16] 曾勇, 周玉淑, 杨莲梅. 新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 372-388.
ZENG Y, ZHOU Y S, YANG L M. A preliminary analysis of the formation mechanism for a heavy rainstorm in western Xinjiang by numerical simulation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(2): 372-388.
- [17] 陈豫英, 苏洋, 杨银, 等. 贺兰山东麓极端暴雨的中尺度特征[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 47-60.
CHEN Y Y, SU Y, YANG Y, et al. The mesoscale characteristics of extreme rainstorm in the eastern region of Helan mountain[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(1): 47-60.
- [18] 陈博宇, 湛芸, 孙继松, 等. 诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制[J]. 大气科学, 2023, 47(1): 1-19.
CHEN B Y, CHEN Y, SUN J S, et al. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the "6.26" mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(1): 1-19.
- [19] 张端禹, 王飞洋, 叶金桃. 2018年登陆热带气旋“温比亚”影响中国黄淮中部强降雨分析[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(6): 10-20.
ZHANG D Y, WANG F Y, YE J T. Characteristics of rainstorms in central Huanghuai area influenced by a landing tropical cyclone "Rumbia" in 2018[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(6): 10-20.
- [20] 郑铮, 潘灵杰, 钱燕珍, 等. 台风“利奇马”造成浙江沿海极端强降水的演变特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 269-278.
ZHENG Z, PAN L J, QIAN Y Z, et al. Evolution characteristics of extreme heavy precipitation in coast of Zhejiang Province caused by Typhoon Lekima[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(2): 269-278.
- [21] 杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. 气象, 2023, 49(12): 1451-1467.
YANG X L, JIN X Q, SUN Y, et al. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang mountains in Hebei Province[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(12): 1451-1467.
- [22] 贺晓露, 李格, 谭江红. 台风“暹芭”引发鄂北暴雨不同阶段中尺度特征及成因分析[J]. 气象科技, 2024, 52(5): 668-680.
HE X L, LI G, TAN J H. Analysis on mesoscale characteristics and causes of different stages of rainstorm in North Hubei caused by Typhoon Chaba[J]. Meteorological Science and Technology,

- 2024, 52(5): 668-680.
- [23] 薛煜, 李靓靓, 朱业, 等. 1323号台风“菲特”螺旋云带中“列车效应”特征及形成分析[J]. 大气科学, 2021, 45(2): 379-392.
XUE Y, LI L L, ZHU Y, et al. Analysis of characteristics and formation of "Train Effect" in the spiral cloud belts of Typhoon "Fitow" (No. 1323)[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(2): 379-392.
- [24] 翁之梅, 李渊, 范敏霜, 等. 三次台风登陆后雨带列车效应特征对比[J]. 气象, 2024, 50(8): 997-1011.
WENG Z M, LI Y, FAN M S, et al. Comparison of the train effect characteristics of rainbands after the landfall of three typhoons[J]. Meteorological Monthly, 2024, 50(8): 997-1011.
- [25] 黄莉, 黄增俊, 白龙, 等. 台风“海燕”(2013)暴雨非对称结构及中尺度特征分析[J]. 热带气象学报, 2017, 33(3): 334-344.
HUANG L, HUANG Z J, BAI L, et al. The analysis of the asymmetric structure and the mesoscale characteristics of Typhoon "Haiyan" (2013)[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(3): 334-344.
- [26] 何立富, 陈双, 郭云谦. 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, 2020, 31(5): 513-526.
HE L F, CHEN S, GUO Y Q. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(5): 513-526.
- [27] 崔梦雪, 向纯怡, 张晗昀, 等. 台风“杜苏芮”(2305)引发福建极端强降雨的特征分析[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(4): 11-20.
CUI M X, XIANG C Y, ZHANG H Y, et al. Characteristics of extreme precipitation in Fujian induced by Typhoon : "Doksuri" (2305)[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(4): 11-20.
- [28] 陈训来, 徐婷, 王蕊, 等. 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, 2024, 35(1): 1-16.
CHEN X L, XU T, WANG R, et al. Fine observation characteristics and causes of "9·7" extreme heavy rainstorm over Pearl River Delta, China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2024, 35(1): 1-16.
- [29] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995(4): 387-405.
WU G X, CAI Y P, TANG X J. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995(4): 387-405.
- [30] 张端禹, 王俊超, 王晓芳, 等. 高、低空急流耦合对山东“利奇马”台风暴雨增幅影响的诊断研究[J]. 大气科学, 2024, 48(2): 445-462.
ZHANG D Y, WANG J C, WANG X F, et al. Diagnostic research on heavy rain growth in Shandong Province influenced by landing Typhoon "Lekima" due to the coupling of upper- and low-level jet streams[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(2): 445-462.
- [31] 高晓梅, 李峰, 王文波, 等. 台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 33-43.
GAO X M, LI F, WANG W B, et al. Multi-scale characteristics of extreme rainstorm caused by Typhoon Lekima in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 33-43.
- [32] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 202-209.
YU X D. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(3): 202-209.
- [33] 黄钰婧, 黄小刚, 周燕. 中国大陆台风远距离极端降水的基本特征[J]. 气象科学, 2024, 44(2): 317-327.
HUANG Y J, HUANG X G, ZHOU Y. Characteristics of typhoon remote extreme precipitation in Chinese Mainland[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2024, 44(2): 317-327.
- [34] 郑丽娜, 俞小鼎, 孙骞, 等. 泰山地区暴雨日中尺度对流系统的组织形态演变及地形的可能影响[J]. 气象学报, 2025, 83(2): 179-192.
ZHENG L N, YU X D, SUN Q, et al. Organization of mesoscale convective systems during rainstorm days in the Tai mountain area: evolution and possible influence of topography[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(2): 179-192.
- [35] 王俊, 姚展予, 侯淑梅, 等. 山东夏季两次极端雨强暴雨的滴谱特征研究[J]. 大气科学, 2023, 47(2): 311-326.
WANG J, YAO Z Y, HOU S M, et al. The characteristics of raindrop size distribution in two rainstorms with extreme rainfall rates in summer in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(2): 311-326.
- [36] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V, HUBBERT J, et al. Rain-drop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(2): 354-365.
- [37] 孙莎莎, 陈博宇, 孙军, 等. 台风“摩羯”(1814)引发山东持续性强降雨的阶段特征及其成因分析[J]. 高原气象, 2023, 42(4): 962-977.
SUN S S, CHEN B Y, SUN J, et al. Periodic characteristics and cause analysis of continuous heavy rainfall induced by Typhoon "Yagi" (1814) in Shandong[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(4): 962-977.
- [38] WEN L, ZHAO K, ZHANG G F, et al. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(5): 2265-2282.
- [39] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 629-643.
DING Y H, LIU Y J, SONG Y F. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 629-643.
- [40] 崔童, 张若楠, 郝立生, 等. 华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系[J]. 大气科学, 2022, 46(4): 903-920.

- CUI T, ZHANG R N, HAO L S, et al. Relationship between the interdecadal variation of rainy season precipitation and water vapor transport in North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(4): 903-920.
- [41] 赵宇, 李静, 杨成芳. 与台风“海鸥”相关暴雨过程的水汽和干侵入研究[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 444-459.
- ZHAO Y, LI J, YANG C F. Study on water vapor and dry intrusion in a heavy rainfall event associated with Typhoon "Haiou" [J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 444-459.
- [42] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 2010, 36(3): 9-18.
- SHOU S W. Theory and application of potential vorticity[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(3): 9-18.
- [43] 田亚杰, 王春明, 崔强. 2015年5月19—20日两广地区暴雨过程数值模拟与诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 18-25.
- TIAN Y J, WANG C M, CUI Q. Numerical simulation and diagnostic analysis of rainstorm over Guangdong and Guangxi region on 19-20 May 2015[J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(1): 18-25.
- [44] CHYI D, WANG X M, YU X D, et al. Synoptic-scale analysis on development and maintenance of the 19—21 July 2021 extreme heavy rainfall in Henan, central China[J]. Journal of Meteorological Research, 2023, 37(2): 174-191.
- [45] 高丽, 潘佳文, 蒋璐璐, 等. 一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J]. 气象, 2021, 47(2): 170-182.
- GAO L, PAN J W, JIANG L L, et al. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(2): 170-182.
- [46] 杨晓霞, 蒋义芳, 胡顺起, 等. 2009年“8·17”鲁南低涡暖式切变线极强降水分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 224-234.
- YANG X X, JIANG Y F, HU S Q, et al. Analysis on an excessive precipitation process triggered by warm shear line with low vortex in southern Shandong on 17 August 2009[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(3): 224-234.

Mesoscale characteristics and formation mechanisms of the "train effect" within the inverted trough rainband of Typhoon "Gaemi"

HU Xiaolin^{1,2}, LI Jun^{1,2*}, ZHOU Li^{3,4}, JIA Rui^{1,2}, LI Yan^{1,2}, HE Kangmin⁵

(1. Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Jinan 250031, China; 2. Zibo Meteorological Office of Shandong Province, Zibo 255048, China; 3. Key Laboratory of Preventing and Reducing Meteorological Disaster in Hunan Province, Changsha 410118, China; 4. Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118, China; 5. Yiyuan Meteorological Office of Shandong Province, Zibo 256100, China)

Abstract: This research utilized raindrop spectrum data, radar data, satellite observations, and ERA5 reanalysis data to diagnose the mesoscale characteristics and convective triggering and maintenance mechanisms of the "train effect" within the inverted trough rainband of Typhoon "Gaemi" (2024 No.3). The results show that from 04:00 to 12:00 on July 28, the mid-level cold air behind the westerly trough and the typhoon inverted trough jointly influenced Shandong. The persistent shear line formed between the low-level southerly jet and the northeasterly winds was stably maintained over the central part of Shandong and the northwestern part of the Shandong Peninsula, ultimately leading to the formation of the "train effect". During the period influenced by the "train effect", high reflectivity factor zones, zones with large gradients of Top Brightness Temperature, and short-duration heavy precipitation areas coincide, with the heavy precipitation exhibiting characteristics of maritime convective precipitation. Upstream of the strong echo band associated with the "train effect", specifically in the junction area of Jining, Zaozhuang, and Linyi, there is a rapid enhancement of echoes. The reflectivity factor of convective cells increases sharply, the echo center height rises quickly, and the cells propagate backward. In contrast, within the strong echo band of the "train effect" the convective cells have already reached a mature stage, with little change in the echo center height and the intensity of the reflectivity factor. The high-temperature and high-humidity region (Pseudo-equivalent potential temperature ≥ 348 K), the water vapor flux convergence line, and the area of negative water vapor flux divergence throughout the layer are consistently located near the

train line. Sustained strong convergence acting on abundant moisture and energy constitutes essential conditions for the "train effect" formation. Distinct mechanisms for both triggering and maintaining convection characterize the rapid echo enhancement region. From 04:00 to 08:00, convergence within the wind field at the apex of the typhoon inverted trough triggers conditional symmetric instability, with the strong convergence center tilting northward as it developed from the lower levels to 500 hPa. From 08:00 to 12:00, the confrontation between the surface cold pool and the low-level warm and moist airflow triggers new convection. The intrusion of dry and cold air with high potential vorticity into the mid-levels promotes the development of positive vorticity advection. The strong baroclinicity and the suction effect of positive vorticity advection lead to low-level convergence and ascent, further intensifying the "train effect".

Key words: typhoon inverted trough; "train effect"; middle-level cold air; cold pool