

翁之梅,李渊,范敏霜,等,2024. 三次台风登陆后雨带列车效应特征对比[J]. 气象,50(8):997-1011. Weng Z M, Li Y, Fan M S, et al, 2024. Comparison of the train effect characteristics of rainbands after the landfall of three typhoons[J]. Meteor Mon, 50(8):997-1011 (in Chinese).

## 三次台风登陆后雨带列车效应特征对比<sup>\*</sup>

翁之梅<sup>1</sup> 李 渊<sup>1</sup> 范敏霜<sup>1</sup> 高 丽<sup>1</sup> 冯也骋<sup>2</sup>  
王 凯<sup>1</sup> 倪钟萍<sup>1</sup> 黄晓龙<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 浙江省台州市气象局, 台州 318000

<sup>2</sup> 复旦大学大气科学与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

**提 要:** 为探讨台风雨带列车效应导致极端降水的可能形成方式和流型配置, 利用多源观测资料, 对 2015 年第 13 号台风苏迪罗(过程 1)、2013 年第 23 号台风菲特(过程 2)和 2005 年第 9 号台风麦莎(过程 3)登陆减弱后的对流雨带列车效应现象进行对比分析。结果表明: 三次过程大暴雨区都发生在浙江东部丘陵东侧迎风坡, 且具有雨带走向与环境背景气流基本一致及水汽通量辐合集中在 850 hPa 以下的共性, 但其环境背景明显不同。过程 1 和过程 2 均由台风外围对流雨带引起, 其中过程 1 雨带位于台风低压与副热带高压之间, 垂直风切变和对流有效位能较大, 水汽来自低纬度海面且湿层深厚; 过程 2 发生在陆上台风残涡与海上另一个台风之间的鞍型场内, 垂直风切变和对流有效位能较小, 水汽来自同纬度海面, 湿层仅位于对流层中下部。过程 3 由台风内核区雨带引起, 垂直风切变强, 对流有效位能最小。进一步分析发现在不同环境垂直风廓线和湿度廓线下三次过程雨带的结构和组织方式呈现出明显差异。在过程 1 中, 对流发展较高, 冷池与偏东气流间形成较深厚边界层辐合, 所构成边界的两侧斜压结构促进来自海面暖湿空气在力管项作用下在边界暖湿一侧抬升, 雨带两侧正负散度配置加强了対流的组织化程度, 使对流单体长时间沿雨带长轴移动; 在过程 2 中, 偏东气流与弱冷池之间风向相反, 风速相当, 辐合较浅薄, 暖云降水起主要作用, 新单体不断在雨带东边界生成、西边界消亡, 雨带停滞少动引发持续强降水; 在过程 3 中, 内核区雨带较大程度受台风涡旋动力学影响, 对流发展高度低, 为典型的热带海洋降水型, 结构随高度略向外侧倾斜, 对流单体在台风本体东侧低空东南风急流脉动产生的风速辐合作用下反复被激发并向下游移动, 引发极端强降水。以上事实说明, 导致极端降水的台风雨带列车效应形成方式多样, 其短时临近预报面临重大挑战。

**关键词:** 台风, 列车效应, 中尺度辐合, 冷池

**中图分类号:** P447, P445

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.030501

## Comparison of the Train Effect Characteristics of Rainbands After the Landfall of Three Typhoons

WENG Zhimei<sup>1</sup> LI Yuan<sup>1</sup> FAN Minshuang<sup>1</sup> GAO Li<sup>1</sup> FENG Yecheng<sup>2</sup>  
WANG Kai<sup>1</sup> NI Zhongping<sup>1</sup> HUANG Xiaolong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Taizhou Meteorological Office of Zhejiang Province, Taizhou 318000

<sup>2</sup> Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

**Abstract:** In order to explore the possible formation mechanism and flow pattern of extreme precipitation caused by the train effect of typhoon rainbands, we comparatively analyze the circulation situation and the convection organization of three heavy rainfall processes related to train effect after the landfall of the Typhoon Soudelor (No. 1513, process 1), the Typhoon Fitow (No. 1323, process 2) and the Typhoon Matsa (No. 0509, process 3) by using multi-source observation data and the ERA5 reanalysis data. The results

<sup>\*</sup> 浙江省台州市科技局社会发展项目(1901gy17)资助

2023 年 5 月 19 日收稿; 2024 年 6 月 3 日收修定稿

第一作者: 翁之梅, 主要从事台风暴雨相关灾害性天气分析预测工作. E-mail: amander1116@163.com

show that the extreme precipitation of the three processes all occurred on the windward slope of the hills in the eastern part of Zhejiang Province. The directions of the rainbands were consistent with the background air flows, and convergence of water vapor flux was mainly concentrated below 850 hPa. However, the ambient backgrounds of the three processes are different obviously. In process 1, the rainband happened between the low pressure and the subtropical high, the vertical wind shear and the CAPE were large, the water vapor came from tropical ocean surface, and the wet layer was thick. Process 2 took place in a saddle-shaped field between the residual vortex of a typhoon over land and another typhoon over the sea. The vertical wind shear and CAPE were weak, water vapor was from the sea surface at the same latitude, and the wet layer was located in the middle and lower level of the troposphere. Process 3 was caused by the spiral rainband in the core zone of typhoon. The vertical wind shear was strong and the CAPE was the minimum. Moreover, the structure and organization of the rainbands in the three process are obviously different. In process 1, the boundary layer convergence and the convective system highly developed, the baroclinic structure of the mesoscale convergence line promoted the uplift of warm and humid air from the sea surface, and the convergence field strengthened the degree of organization. In process 2, the wind direction of the weak cold pool was opposed to the easterly airflow, while with similar wind speed and shallow convergence. The warm cloud rain was dominant. The new cells continued to form at the eastern boundary of the rainbands, and dissipated at the western boundary. The stagnation of rainband caused continuous belt-like heavy rainfall area. In process 3, the spiral bands in the inner-core section of typhoon were affected by the typhoon vortex dynamics, the convection developed at lower height, and the structure tilted slightly to the outside. The rainband developed with the wind speed convergence caused by the fluctuating of southeast jet, which resulted in extreme rainfall. The above facts show that the train effect of typhoon rainbands causing extreme precipitation can be formed in various ways, so there are great challenges faced in the short-time forecasting and nowcasting of such extreme precipitation.

**Key words:** typhoon, train effect, mesoscale convergence, cold pool

## 引 言

准静止或停滞少动的中尺度对流系统往往能引发暴雨和洪涝,是预报员关注重点(Chappell, 1986)。在雷达回波上,有组织的对流回波像火车车厢一样不断经过同一个位置的近乎静止的现象被称为列车效应(Doswell III et al, 1996; 俞小鼎等, 2006; 俞小鼎, 2013)。这种现象是产生极端降水从而造成洪涝灾害的主要回波特征之一(杨春等, 2009; 黄小玉等, 2010; 何群英等, 2011; 湛芸等, 2012; 孙军等, 2012; 俞小鼎, 2012; 孙继松等, 2012; 陈明轩等, 2013; 青泉等, 2015; 杨磊等, 2017; 吴涛等, 2017; 田付友等, 2018)。对列车效应发生发展机制的研究指出其一般发生在低空暖湿气流或低空急流附近(Corfidi, 2003; 俞小鼎等, 2006; 俞小鼎, 2013)。经常可见深厚的西南急流导致线状中尺度对流系统回波主轴与回波移动方向基本一致(胡雅

君等, 2020)。向下风向倾斜的深厚强回波单体沿着辐合线间隔排列,低空切变线、地面辐合线和雨带走向一致(范元月等, 2020)。规则排列的中小尺度次级垂直环流可能是导致列车效应形成和维持的原因之一(柯文华等, 2012)。一些个例的反射率因子表现为低质心、垂直发展旺盛、高效率的强回波连续经过同一地区,并具有热带降水回波特征,水汽通量散度和假相当位温大值区主要位于 925 hPa 以下的边界层中(孙素琴等, 2015)。Schumacher and Johnson(2005; 2008)和 Schumacher(2009)研究指出准静止中尺度对流系统发展具有后向传播型和邻近层状云合并型两种模式,对流冷池触发的低层重力波是线性组织形成的主要原因。俞小鼎(2012)在研究北京 7·21 特大暴雨事件时指出,午后加强的东南偏南低空急流输送大量水汽于太行山前强迫抬升,激发新单体在中尺度对流单体西南侧生成,西南向的后向传播和东北向平流结合,导致对流单体反复经过同一个区域形成列车效应引发极端降水。孙继

松等(2013)研究发现雨带内对流单体的发展和传播可能是由条件性静力不稳定环境下发展的惯性重力波激发和传播的结果。Peters and Schumacher (2015)发现层状云合并型对流雨带趋向于往冷池高度上垂直风切变下风处发展。

台风螺旋云带跟随台风中心呈螺旋式向前运动,常引发大暴雨或特大暴雨。诸多学者研究表明,螺旋雨带列车效应是台风引发大暴雨的重要原因(何立富等,2020;娄小芬等,2020;郑铮等,2021)。沿海形成的地面附近中尺度扰动辐合或扰动涡旋,为螺旋云带中对流在沿海地区发生或发展提供了重要条件(薛煜等,2021)。

本研究通过多次台风雨带列车效应导致极端降水事件的分析,揭示列车效应形成的可能方式及对应的流型配置,为台风雨带列车效应导致的极端降水的短时临近预报提供线索。以往研究多从列车效应个例的形态特点角度分析,鲜少从多次过程中小尺度结构的共性和差异特征角度进行分析,进而揭示列车效应形成方式的多样性,评估列车效应导致的极端降水短时临近预报难度。2015年第13号台风苏迪罗(Soudelor)、2013年第23号台风菲特(Fitow)、2005年第9号台风麦莎(Matsa)登陆后强

度迅速减弱,其环流东部对流雨带发展加强,形成典型的列车效应特征,引发浙江沿海出现大暴雨,雨量远超主客观预报结果。预报员对此类线状中尺度对流雨带发生发展和维持缺少有效预报方法,本文利用包括多普勒天气雷达资料在内的多源探测资料和ERA5再分析资料,从不同尺度分析影响三次列车效应过程组织发展和维持的因子,揭示其可能的多样性形成方式,以期类似事件的短时临近预报、预警提供线索和思路。

## 1 资料与个例概况

### 1.1 资料

台风资料选用中国气象局台风最佳路径资料和中国气象局台风整编资料。降水、气温、10 m 风等地面气象要素选取浙江省国家级地面气象观测站和区域地面自动气象观测站数据,天气雷达资料选取位于浙江中部沿海的台州市、舟山市多普勒 S 波段天气雷达,约 6 min 体扫一次的基数据资料(图 1)。环境背景场分析采用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),空间分辨率

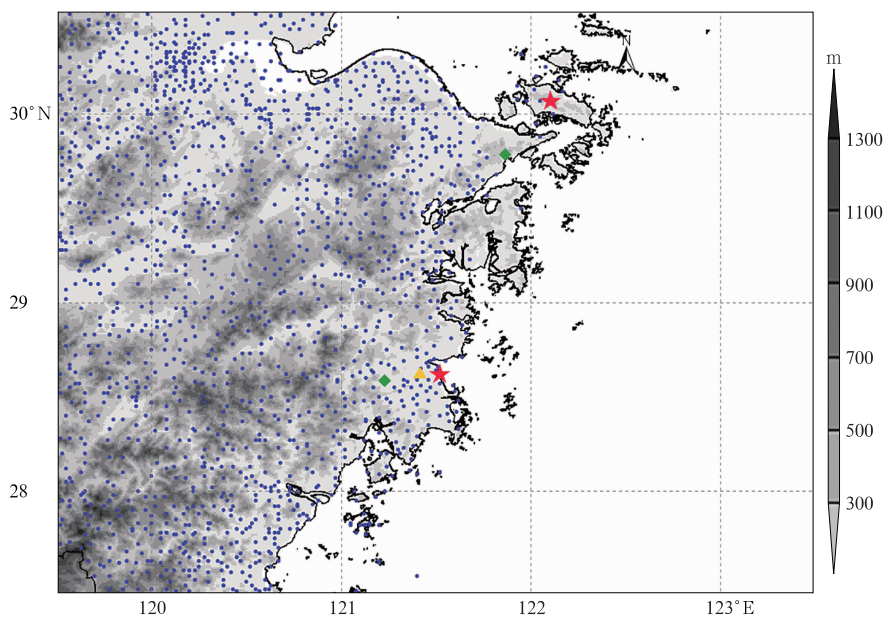


图 1 研究区域地形高度(阴影)叠加雷达站(五角星)、暴雨中心(菱形)及地面气象观测站(圆点)分布

Fig. 1 Terrain (shaded), radar stations (pentagram), radiosonde stations (triangle), rainstorm centers (diamond) and automatic meteorological stations (dot) in the study area

0.25°×0.25°,时间间隔 1 h。全文地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改。

### 1.2 个例概况

2015 年第 13 号台风苏迪罗于 8 月 8 日 22:00 (北京时,下同)以强热带风暴级登陆福建莆田,并穿过福建中部进入江西抚州一带,逐渐减弱为热带低压,其东北象限螺旋雨带呈东南—西北走向在温州以东海面—台州—宁波四明山区一带长时间停滞发展,列车效应特征维持约 11 h(表 1),致使浙江东部出现带状大暴雨区(图 2a),108 个站点过程累计雨量超过 100 mm,最大为台州的黄岩高桥和临海汛桥(突破 300 mm),期间小时雨量最大为 84.9 mm,3 h 雨量最大达 205.9 mm。

2013 年第 23 号台风菲特 10 月 7 日 01:00 以强台风级别登陆福建福鼎,其本体雨带在浙闽引发强降雨,于登陆后 8 h 在福建北部减弱为热带低压。当天 20:00 第 24 号台风丹娜丝以强台风级别进入东海东部海面,逐渐北上。两个低值系统之间的线状中尺度对流雨带在浙江近海海面西进,进入陆地后加强发展,稳定维持约 12 h(表 1),造成浙江东部连续出现南北向大暴雨带(图 2b),117 个站点雨量

超 100 mm,最大为台州临海汇溪(252.0 mm),最大雨强出现在台州黄岩高桥,小时雨量和 3 h 雨量分别达 68.3 mm 和 168.6 mm。

2005 年第 9 号台风麦莎 8 月 6 日 03:40 以强台风级别登陆浙江玉环,7 h 后在浙江境内逐渐减弱为强热带风暴。其本体螺旋雨带在浙江近海海面停滞少动,持续影响约 16 h(表 1),造成浙江东北部宁波和舟山出现大暴雨到特大暴雨(图 2c),16 个站点过程累计雨量超 100 mm,最大为宁波北仑春晓(321.4 mm),其小时雨量最大达 73.9 mm,3 h 雨量超 130 mm。

### 1.3 雨带组织发展方式

上述三次大暴雨过程都受到台风登陆减弱后的对流雨带列车效应影响,但在雨带组织方式上有所不同。根据雨带反射率因子和风暴单体移动信息分析(图 3),过程 1 和过程 3 雨带均呈东南—西北走向,由排列成行的对流单体组成,新单体不断自南向北移动经过同一个区域,单体移动方向和雨带走向基本一致。而过程 2 对流雨带成南北走向,新单体自东向西并入雨带的东边界,而在西边界减弱消亡,单体移动方向与雨带走向接近正交,单体在同一个带状区域反复生消,使雨带长时间停滞少动。

表 1 台风个例登陆相关信息

Table 1 Information on the landing of typhoon cases

编号	台风名称	登陆时间/BT	登陆中心风速/(m·s <sup>-1</sup> )	登陆地点	列车效应起止时间/BT
1513	苏迪罗	2015 年 8 月 8 日 22:00	30	福建莆田	2015 年 8 月 9 日 15:00 至 10 日 02:00
1323	菲特	2013 年 10 月 7 日 01:00	42	福建福鼎	2013 年 10 月 7 日 20:00 至 8 日 08:00
0509	麦莎	2005 年 8 月 6 日 03:40	45	浙江玉环	2005 年 8 月 6 日 11:00 至 7 日 03:00

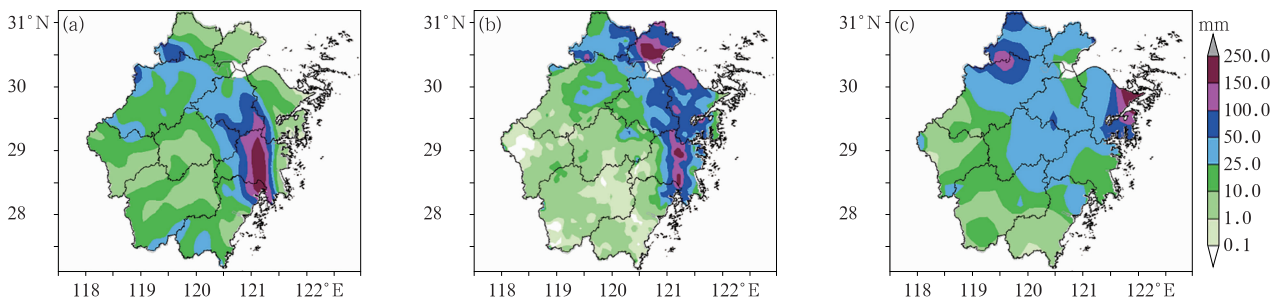


图 2 三次台风雨带列车效应过程雨量分布

(a)2015 年 8 月 9 日 15:00 至 10 日 02:00,(b)2013 年 10 月 7 日 20:00 至 8 日 08:00,(c)2005 年 8 月 6 日 11:00 至 7 日 03:00

Fig. 2 Rainfall distribution of three heavy typhoon rainfall processes related to train effect of rainbands after the typhoons' landing from (a) 15:00 BT 9 to 02:00 BT 10 August 2015, (b) 20:00 BT 7 to 08:00 BT 8 October 2013 and (c) 11:00 BT 6 to 03:00 BT 7 August 2005



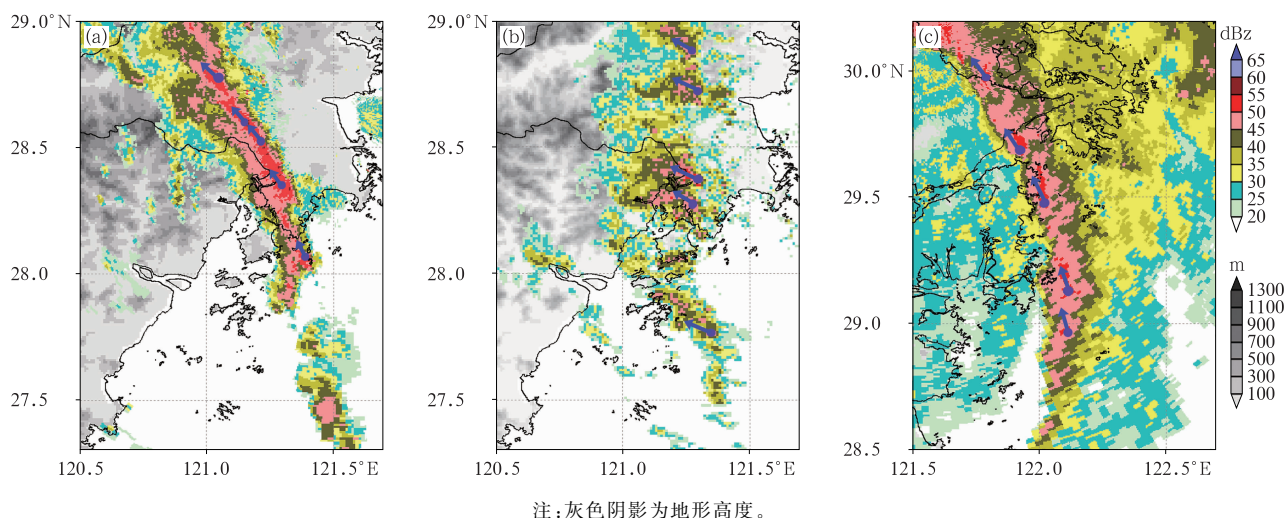


图 3 三次台风雨带列车效应过程雷达组合反射率因子(填色)及对流单体移动方向(箭头)

(a)2015 年 8 月 9 日 18:00,(b)2013 年 10 月 8 日 01:00,(c)2005 年 8 月 6 日 18:03

Fig. 3 Composite reflectivity (colored) and storm tracking information (arrow) of three heavy typhoon rainfall processes related to train effect of rainbands after the typhoons' landing at (a) 18:00 BT 9 August 2015, (b) 01:00 BT 8 October 2013 and (c) 18:03 BT 6 August 2005

## 2 三类雨带列车效应特征形成的环境背景特征对比

### 2.1 环境流场特征对比

由图 4 的三次过程环流背景分析可见,雨带长轴与其上空 500 hPa 气流方向夹角均较小,且列车效应特征均发生在台风登陆至少 15 h 后,但三次过程有截然不同的发生背景。

在 500 hPa 高度上,过程 1 高度场呈典型的西低东高形势,雨带发生在减弱的“苏迪罗”低压环流

580 dagpm 等高线与副热带高压 588 dagpm 等高线之间的大范围偏南风气流中,浙江东南部上空风速达  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;过程 2 发生于两个低值系统之间的鞍型场内,减弱后的“菲特”环流仅在 500 hPa 表现为 584 dagpm 等高线,东海海面  $127^\circ \text{E}$  附近存在“丹娜丝”576 dagpm 环流,浙江东南部上空风速较弱,仅  $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;过程 3,“麦莎”螺旋雨带发生在台风环流内部,浙江东北部上空风速达  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 2.2 水汽输送特征对比

由三次列车效应过程发生期间小时雨量最大时次浙江沿海 925 hPa 水汽通量分布(图 5a~5c)可

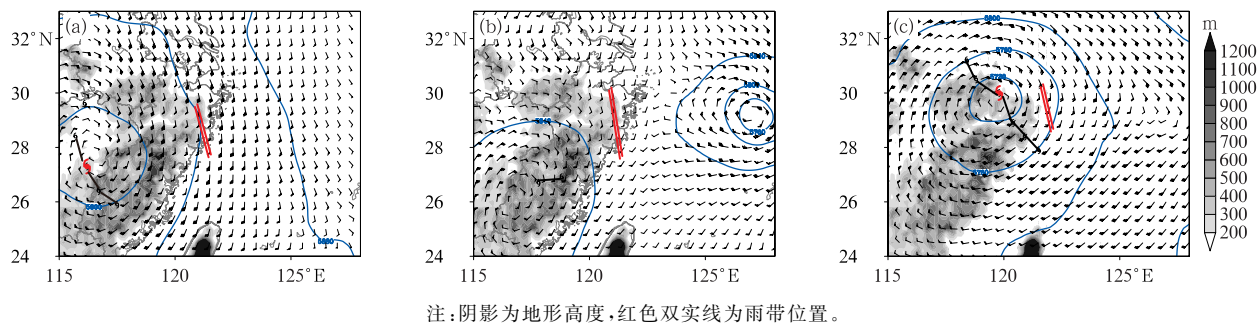
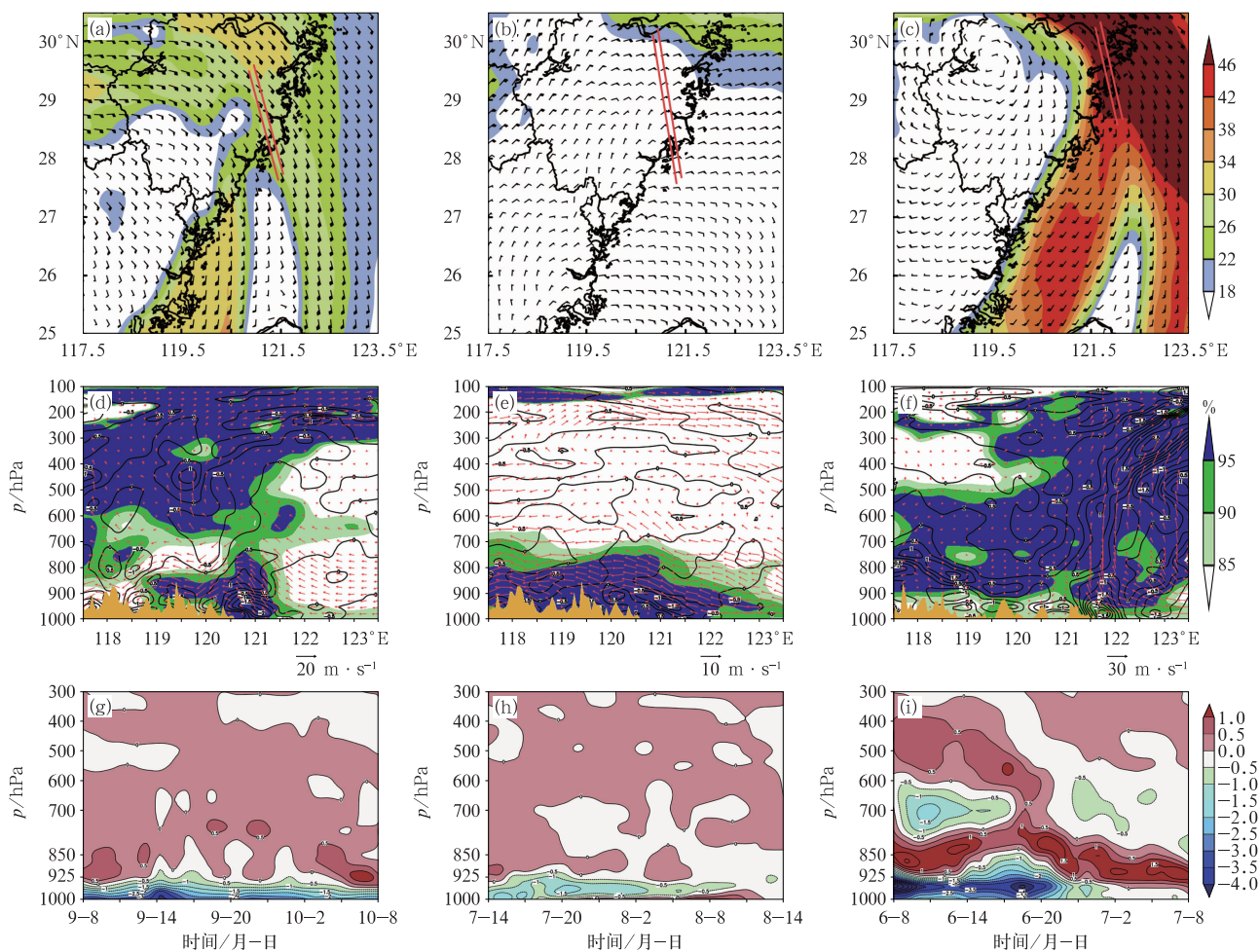


图 4 三次台风雨带列车效应过程 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)与 850 hPa 风场(风羽)

(a)2015 年 8 月 9 日 18:00,(b)2013 年 10 月 8 日 01:00,(c)2005 年 8 月 6 日 18:00

Fig. 4 Geopotential height at 500 hPa (isoline, unit: gpm) and wind field at 850 hPa (barb) during three heavy typhoon rainfall processes related to train effect of rainbands after the typhoons' landing at (a) 18:00 BT 9 August 2015, (b) 01:00 BT 8 October 2013 and (c) 18:00 BT 6 August 2005



注:图 a~c 中,红色双实线为雨带位置;图 d~f 中,风矢为  $u\omega$  合成风场, $\omega$  扩大 10 倍。

图 5 (a~c) 925 hPa 水汽通量(填色,单位:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ) 和风场(风羽), (d,e) 沿  $28.5^\circ\text{N}$  和 (f) 沿  $29.8^\circ\text{N}$  的相对湿度(填色)、散度(等值线,单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、风场(风矢)的垂直剖面 and 地形高度(黄色阴影), (g,h)  $28.5^\circ\text{N}$ 、 $121.2^\circ\text{E}$  和 (i)  $29.8^\circ\text{N}$ 、 $121.9^\circ\text{E}$  水汽通量散度随时间垂直变化(填色和等值线,单位:  $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

(a,d,g) 2015 年 8 月 9 日 18:00, (b,e,h) 2013 年 10 月 8 日 01:00, (c,f,i) 2005 年 8 月 6 日 18:00

Fig. 5 (a-c) 925 hPa water vapor flux (colored, unit:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ) and wind field (barb),

(d-f) the cross-section of relative humidity (colored), divergence (isoline, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),

wind field (wind vector) along (d, e)  $28.5^\circ\text{N}$  and (f)  $29.8^\circ\text{N}$  and terrain height (yellow shaded),

(g-i) the vertical variation with time of moisture flux divergence (colored and isoline, unit:  $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ) at (g, h)  $28.5^\circ\text{N}$ ,  $121.2^\circ\text{E}$  and (i)  $29.8^\circ\text{N}$ ,  $121.9^\circ\text{E}$  at (a, d, g) 18:00 BT 9 August 2015,

(b, e, h) 01:00 BT 8 October 2013 and (c, f, i) 18:00 BT 6 August 2005

见:过程 1 水汽输送呈东南—西北走向,水汽通量强度达到  $2.8 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ;过程 2 受“丹娜丝”影响,水汽自东向西输送,水汽通量在  $2.0 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  以下;过程 3,来自于浙闽近岸南西南气流和来自于东海海面的东南气流汇合于浙江东北部地区,水汽通量在  $3.2 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  以上,明显强于发生在台风外围的过程 1 和过程 2。

从水汽的垂直环流分析(图 5d~5f)可知,三次过程水汽凝结抬升都位于沿海丘陵东侧迎风坡至海岸线之间。来自台风东侧环流的暖湿空气自海面面向西运动,经过沿海平原后在丘陵迎风坡抬升,摩擦和强迫抬升作用有利于水汽的高效凝结降落,其中台风内核区过程 3 垂直运动、湿层厚度均大于发生在台风外围的过程 1 和过程 2。

水汽通量散度分析(图 5g~5i)显示:三次过程

水汽通量辐合都集中在 850 hPa 以下的边界层内,其中台风外围对流雨带(过程 1 和过程 2)具有更低的水汽通量辐合区,基本位于 925 hPa 以下,三次过程的最大水汽辐合强度分别超过  $3.0 \times 10^{-6}$ 、 $1.5 \times 10^{-6}$  和  $4.0 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。

### 2.3 不稳定层结条件对比

根据浙江东部洪家站探空曲线分布(图 6),三次过程环境垂直温度递减率都介于干、湿绝热递减率之间,且更接近于湿绝热线,说明具有较弱的条件不稳定特征,但由于低层露点温度较高,构成的对流有效位能(CAPE)并不小。过程 1 整个大气对流层近于饱和,925~500 hPa 均为东南急流,850~400 hPa 风速均超  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地面至 850 hPa 风速差达  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直风切变强;表征深厚湿对流潜势的 CAPE 达  $1698 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。过程 2 在 600 hPa 以下为近饱和层,600 hPa 以上温度露点差大于  $20^\circ\text{C}$ ,地面至 850 hPa 风速在  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,地面至 700 hPa

风速差为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直风切变中等偏强;CAPE 值达  $742 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。过程 3,“麦莎”螺旋雨带湿层深厚,由于受到对流活动污染,CAPE 仅为  $44.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (代表性不佳),与台风外围雨带中的两次过程相差甚远。可见中等偏强的 CAPE 和垂直风切变是台风外围对流雨带形成列车效应的重要条件。

## 3 中小尺度热动力特征对比

### 3.1 冷池与中尺度辐合演变

过程 1: 2015 年 8 月 9 日 15:00“苏迪罗”已登陆,浙江省  $121^\circ\text{E}$  以东沿海平原已经连续 14 h 没有降雨,在东南暖湿气流持续影响下,气温升至  $30^\circ\text{C}$  左右; $121^\circ\text{E}$  以西丘陵地区在东南气流影响下 24 h 降雨量已经超过 100 mm,气温在  $26^\circ\text{C}$  以下,地面已经产生冷池。从扰动温度分布(图 7a)可见,此时沿海与丘陵上空的冷池之间形成一定强度的中尺

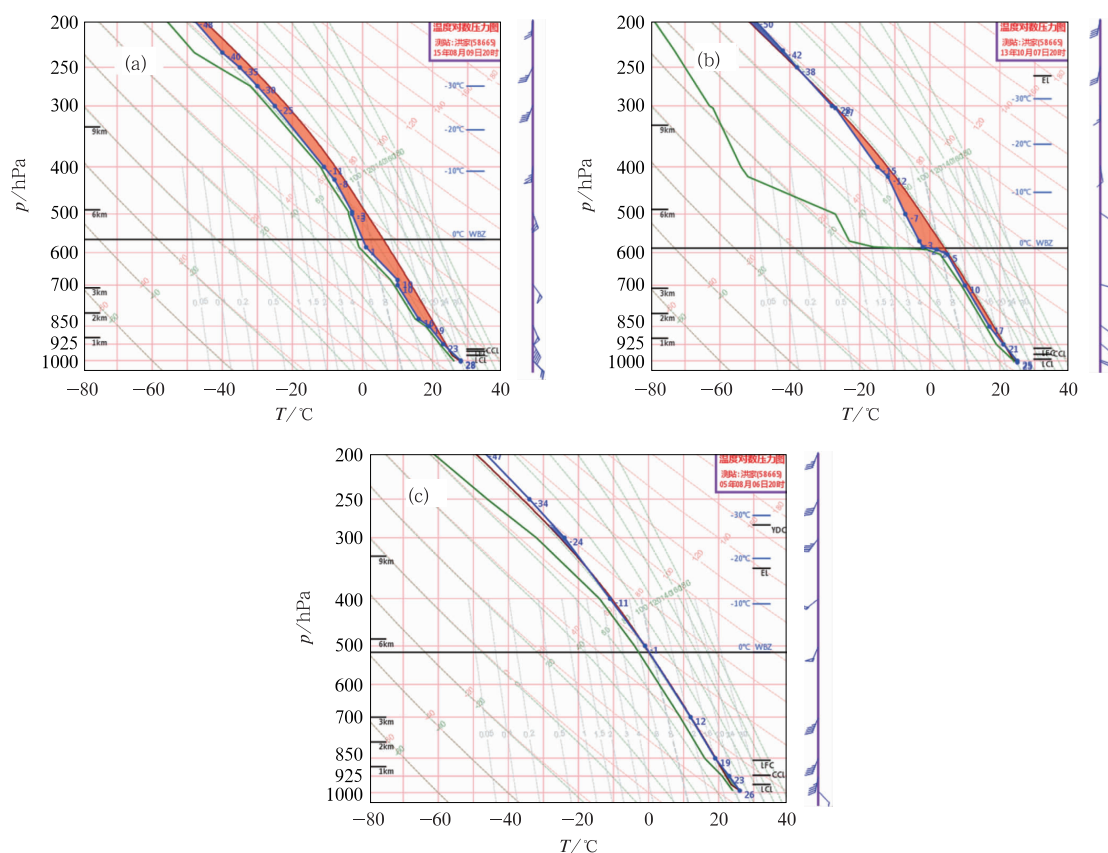


图 6 三次台风雨带列车效应过程  $T\text{-ln}p$  图

(a)2015 年 8 月 9 日 20:00,(b)2013 年 10 月 7 日 20:00,(c)2005 年 8 月 6 日 20:00

Fig. 6 The skew  $T\text{-ln}p$  of three heavy typhoon rainfall processes related to train effect of rainbands after typhoons' landing at (a) 20:00 BT 9 August 2015, (b) 20:00 BT 7 October 2013 and (c) 20:00 BT 6 August 2005



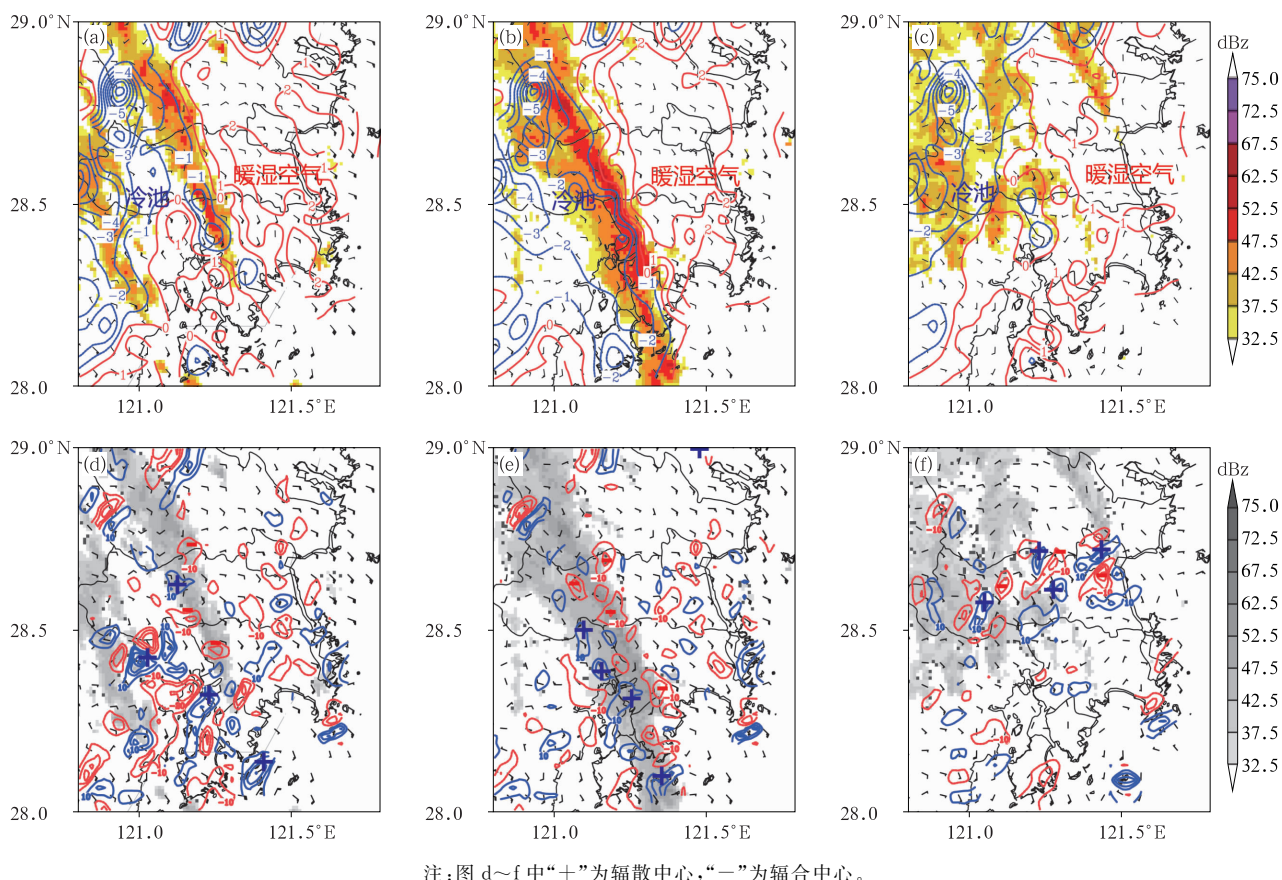


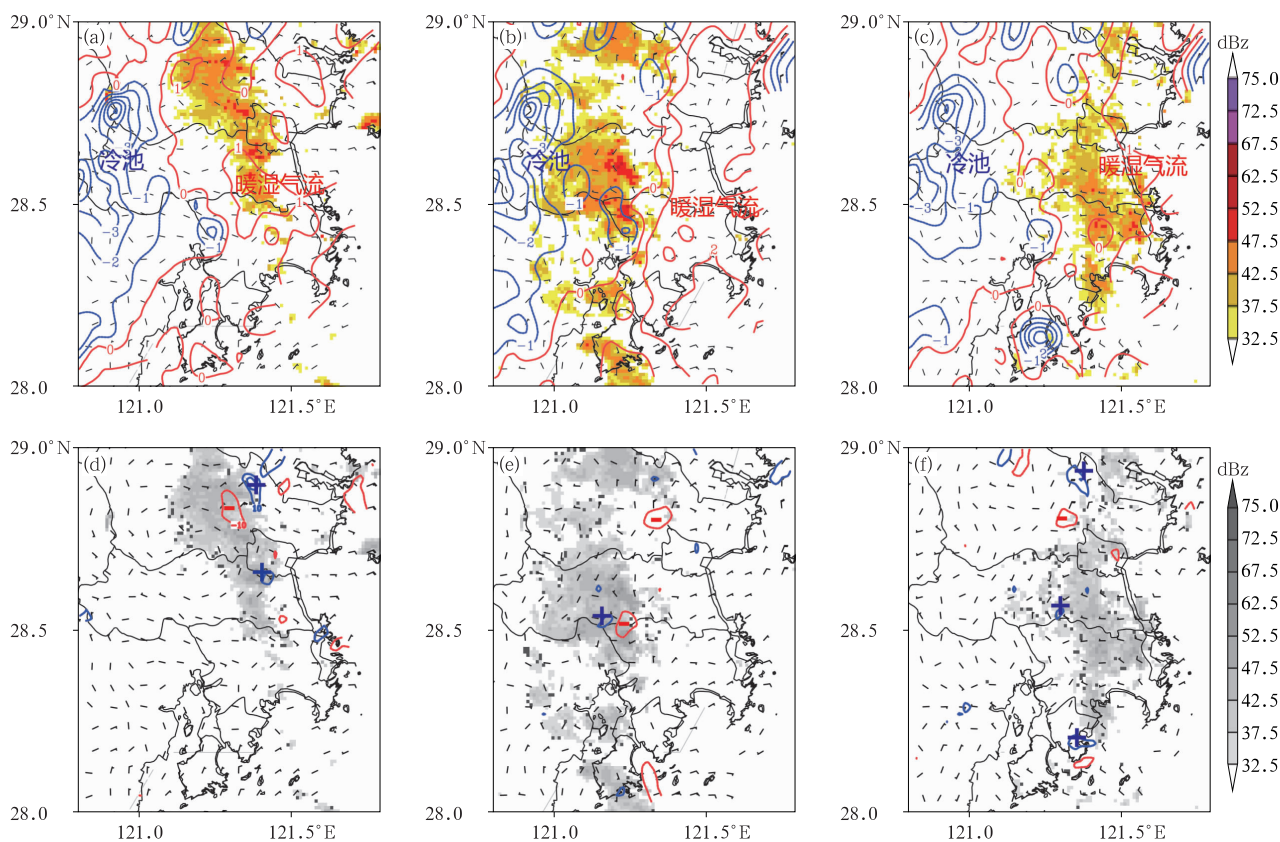
图 7 2015 年 8 月 (a, d) 9 日 15:00, (b, e) 9 日 18:00, (c, f) 10 日 02:00 (a~c) 雷达组合反射率因子 (填色)、扰动温度 (等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和 2 min 平均风 (风羽), (d~f) 散度场 (等值线, 单位:  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )、2 min 平均风 (风羽) 和雷达组合反射率因子 (阴影)

Fig. 7 (a~c) Composite reflectivity (colored), disturbance temperature (isoline, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), 2 min mean wind (barb), (d~f) divergence field (isoline, unit:  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), 2 min mean wind (barb), composite reflectivity (shaded) at (a, d) 15:00 BT 9, (b, e) 18:00 BT 9 and (c, f) 02:00 BT 10 August 2015

度温度锋区,零散的弱对流逐渐表现出线性组织化特征,逐渐形成一条东南—西北走向的线状中尺度雨带。高桥周边地区已出现最大雨强为  $40 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的降雨。9 日 18:00, 中尺度锋区呈准静止状态,地面等扰动气温线更为密集(图 7b),对流雨带两侧温差达  $4^{\circ}\text{C}$ ,冷池效应迅速增强。沿海大范围东南气流,2 min 平均中心风速达  $15.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在雨带东边缘形成一条整齐排列的  $\gamma$  中尺度辐合中心(图 7e),辐合强度超过  $10 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;雨带西缘形成一系列强度超过  $10 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的  $\gamma$  中尺度辐散中心。雨带表现出高度的组织化和列车效应特征,反射率因子超过  $52.5 \text{ dBz}$  的单体成队列状自南部海岸线北上,引发台州高桥连续 3 h 内雨强均超  $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,累计雨量突破  $200 \text{ mm}$ 。10 日 02:00,沿海东南风速明显减小,地面等扰动气温线趋于疏散(图 7c),中尺度雨带线状结构消失,呈现分散弱对

流性降水回波特征。高桥周边地区雨强减弱至  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以下。上述观测事实表明,过程 1 在东南暖湿气流影响下的沿海地区与长时间强降水下形成的丘陵冷池之间形成的中尺度锋区结构,促进了暖湿空气在力管项作用下发生的抬升运动。急流下浙东丘陵侧向摩擦下产生的正负散度对进一步加强了雨带的组织化。东南急流是中尺度锋区和中尺度辐合形成的先决条件。

过程 2: 2013 年 10 月 7 日 10:00 “菲特”登陆减弱,浙江沿海降雨出现间歇,中午前后沿海平原地区气温普遍升至  $28 \sim 30^{\circ}\text{C}$ ,但  $121^{\circ}\text{E}$  以西丘陵地区雨止时间滞后约 3 h,气温仅维持在  $23 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 。19:00—20:00,沿海海面分散弱雨带在深厚的偏东气流下向陆地靠近,雨带进入海岸线时范围和强度逐步发展,在三门湫水山、临海羊岩山和兰田山、台州绿心一带,形成一条南北向对流雨带(图 8a)。雨



注:图 d~f 中“+”为辐散中心,“-”为辐合中心。

图 8 2013 年 10 月(a,d)7 日 20:00,(b,e)8 日 01:00,(c,f)8 日 05:00(a~c)雷达组合反射率因子(填色)、扰动温度(等值线,单位:℃)和 2 min 平均风(风羽),(d~f)散度场(等值线,单位: $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )、2 min 平均风(风羽)和雷达组合反射率因子(阴影)

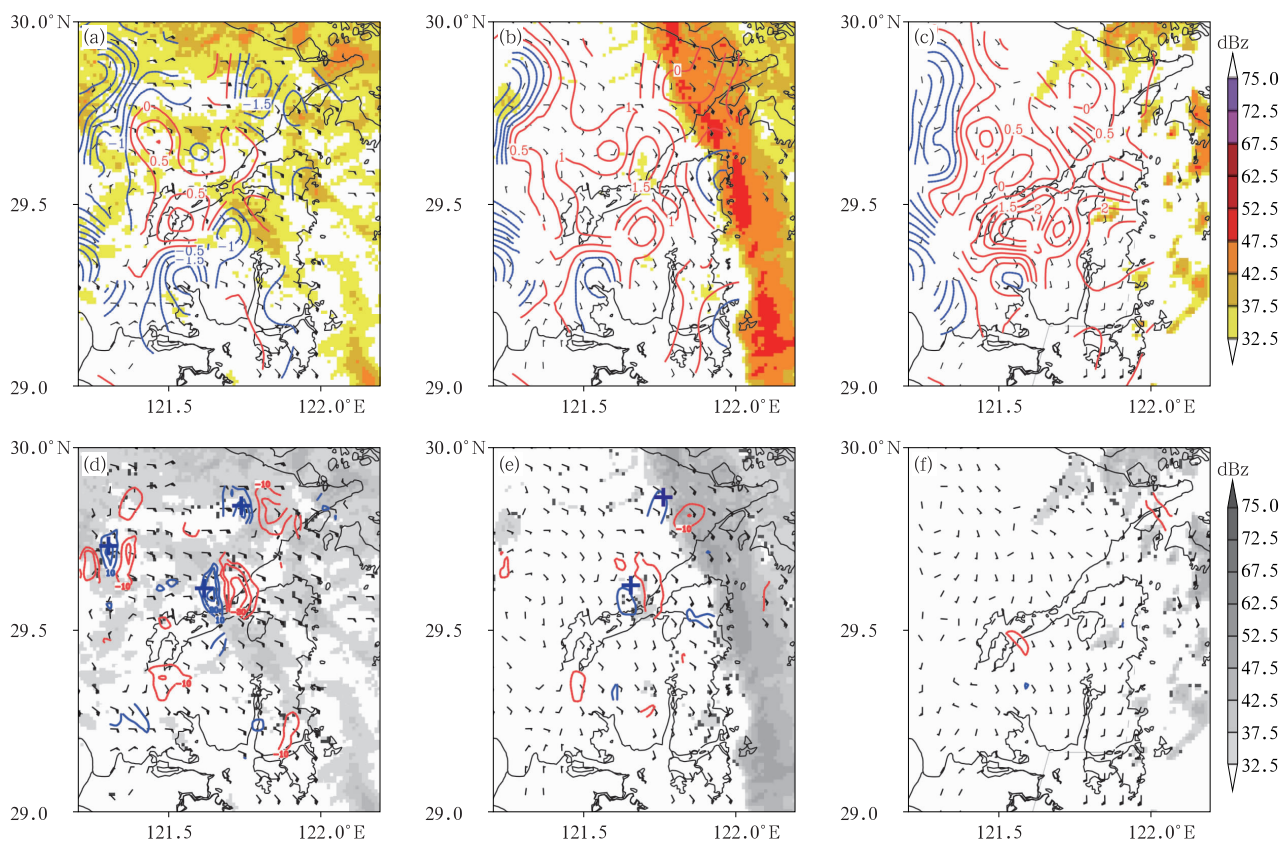
Fig. 8 (a—c) Composite reflectivity (colored), disturbance temperature (isoline, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), 2 min mean wind (barb), (d—f) divergence field (isoline, unit:  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), 2 min mean wind (barb), composite reflectivity (shaded) at (a, d) 20:00 BT 7, (b, e) 01:00 BT 8 and (c, f) 05:00 BT 8 October 2013

带均处于扰动温度较高的东部沿海地区,散度场上仅在雨带东侧存在一个  $\gamma$  中尺度辐合中心(图 8d)。高桥周边地区已出现最大雨强为  $30 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的降雨。8 日 01:00,对流雨带进一步西进到  $121.0^{\circ}\text{E} \sim 121.3^{\circ}\text{E}$ ,东部沿海平原地区有较大范围弱偏东气流,2 min 平均风速均在  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,雨带呈现准静止状态。雨带上有两个  $\gamma$  中尺度辐合中心发展(图 8e),东西两侧存在  $2^{\circ}\text{C}$  扰动温差(图 8b)。与 7 日 20:00 相比,地面辐合和中尺度斜压性略有增强,但不及“苏迪罗”登陆后对流雨带。在停滞的对流雨带影响下,台州高桥 1 h 和 3 h 雨量分别达到 68.3 mm 和 168.3 mm,临海汇溪持续 4 h 雨强均超  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。8 日 05:00,地面风场转为弱偏西风,雨带开始东退至  $121.3^{\circ}\text{E}$  以东,地面辐合中心强度和雨带两侧温差减小(图 8c,8f),研究区域内雨

强减小至  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以下。上述观测事实表明,尽管停滞型列车效应过程雨带的地面中尺度斜压性和辐合场强度不强,但来自海面的持续偏东气流与丘陵上空弱冷池之间对峙导致雨带停滞少动,仍可以产生持续带状强降水区。

过程 3:2005 年 8 月 6 日 11:00“麦莎”中心位于温州永嘉和台州仙居交界的括苍山脉西段,螺旋雨带主体位于近海海面,浙江东北部处于其内核雨带影响中,反射率因子强度在  $30 \sim 40 \text{ dBz}$ (图 9a),宁波东北部持续东南大风,风速中心出现在象山与普陀之间的六横岛,达  $20.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地面辐合强度达  $15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,气温为  $24 \sim 25^{\circ}\text{C}$ , $121.5^{\circ}\text{E}$  以东的扰动温度负值区主要分布在海拔  $100 \sim 200 \text{ m}$  沿海丘陵(图 9d)。春晓街道周边最大雨强在  $15 \sim 35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。6 日 18:00,“麦莎”中心移动到金华、绍兴、杭





注:图 d~f 中“+”为辐散中心,“-”为辐合中心。

图 9 2005 年 8 月(a,d)6 日 11:00,(b,e)6 日 18:00,(c,f)7 日 03:00(a~c)雷达组合反射率因子(填色)、扰动温度(等值线,单位:℃)和 2 min 平均风(风羽),(d~f)散度场(等值线,单位: $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )、2 min 平均风(风羽)和雷达组合反射率因子(阴影)

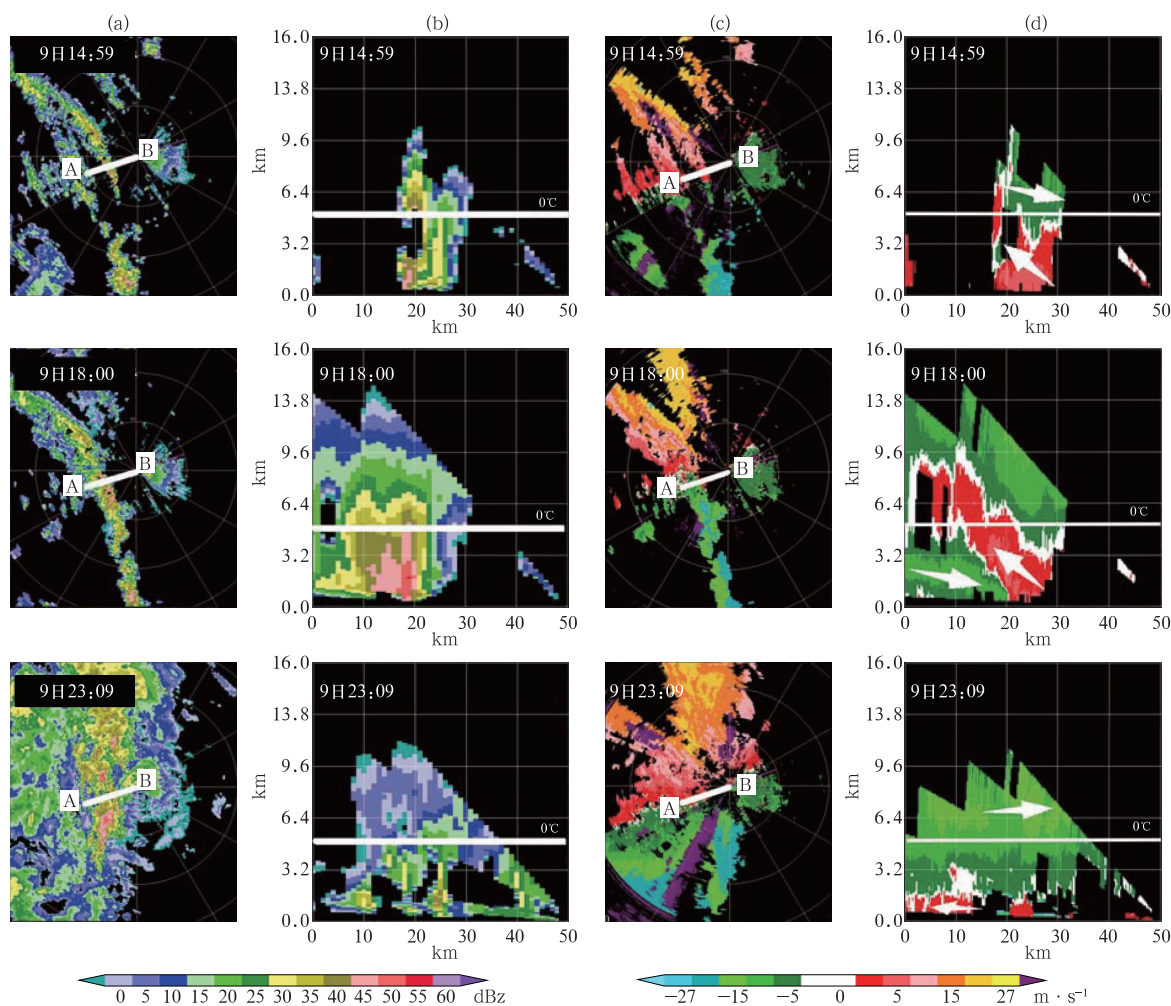
Fig. 9 (a-c) Composite reflectivity (colored), disturbance temperature (isoline, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), 2 min mean wind (barb), (d-f) divergence field (isoline, unit:  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), 2 min mean wind (barb), composite reflectivity (shaded) at (a, d) 11:00 BT 6, (b, e) 18:00 BT 6 and (c, f) 03:00 BT 7 August 2005

州三地交界的龙门山一带,宁波东部地区 2 min 平均风速减弱到  $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,陆上辐合辐散中心强度减弱,强度超  $15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的范围明显缩小(图 9e),这种减弱趋势可能与台风环流的减弱趋势有关。此时近海的六横岛瞬时风速仍达  $25.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明沿海局地仍存在强风速辐合区,对应时次的螺旋雨带结构紧实(图 9b)。受其影响,17:00—18:00 春晓街道雨强加强至  $73.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,18:00—19:00 仍维持在  $50.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。7 日 03:00,“麦莎”已进入安徽东南部,宁波东部风向顺转为偏南气流,2 min 平均风速和辐合进一步减弱(图 9f),对流雨带主体东移北抬入海。研究区域内雨强均降至  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以下。综上所述,台风内核区主雨带较明显地受到台风自身涡旋动力学影响,近地面的辐合强度随台风自身强度而变化。

### 3.2 冷池垂直结构和垂直风切对比

陶祖铨(1980)指出低空急流总是与暖舌相结合,使低层的假相当位温增大,导致对流层中下层条件不稳定和 CAPE 增大,对流抑制能量减小,有利于对流的发展。多普勒雷达的 VWP 产品可以反映雷达所在地上空风的垂直分布(俞小鼎等,2006)。采用雷达反射率因子、径向速度结构和 VWP 产品对三次过程的对流垂直结构进行对比。

过程 1:由 2015 年 8 月 9 日 14:59 VWP 产品可见,雷达站上空 5 km 高度以下为大范围东南气流,1.2~3.7 km 高度存在  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的急流中心(图略)。由雨带反射率因子和径向速度剖面(图 10)可见,此时 40 dBz 以上的强回波发展高度已经发展到 5 km,30 dBz 回波超过 7 km,均高于  $0^{\circ}\text{C}$  层高度。



注:图 a,c 中直线 AB 为剖面位置,图 b,d 中白色横线为  $0^{\circ}\text{C}$  层高度,图 d 中箭头为气流方向。

图 10 2015 年 8 月 9 日 14:59—23:09(a,c)列车效应对流雨带雷达(a)组合反射率因子与(c) $0.5^{\circ}$ 仰角径向速度,(b,d)沿雨带横切面的(b)反射率因子与(d)径向速度垂直剖面

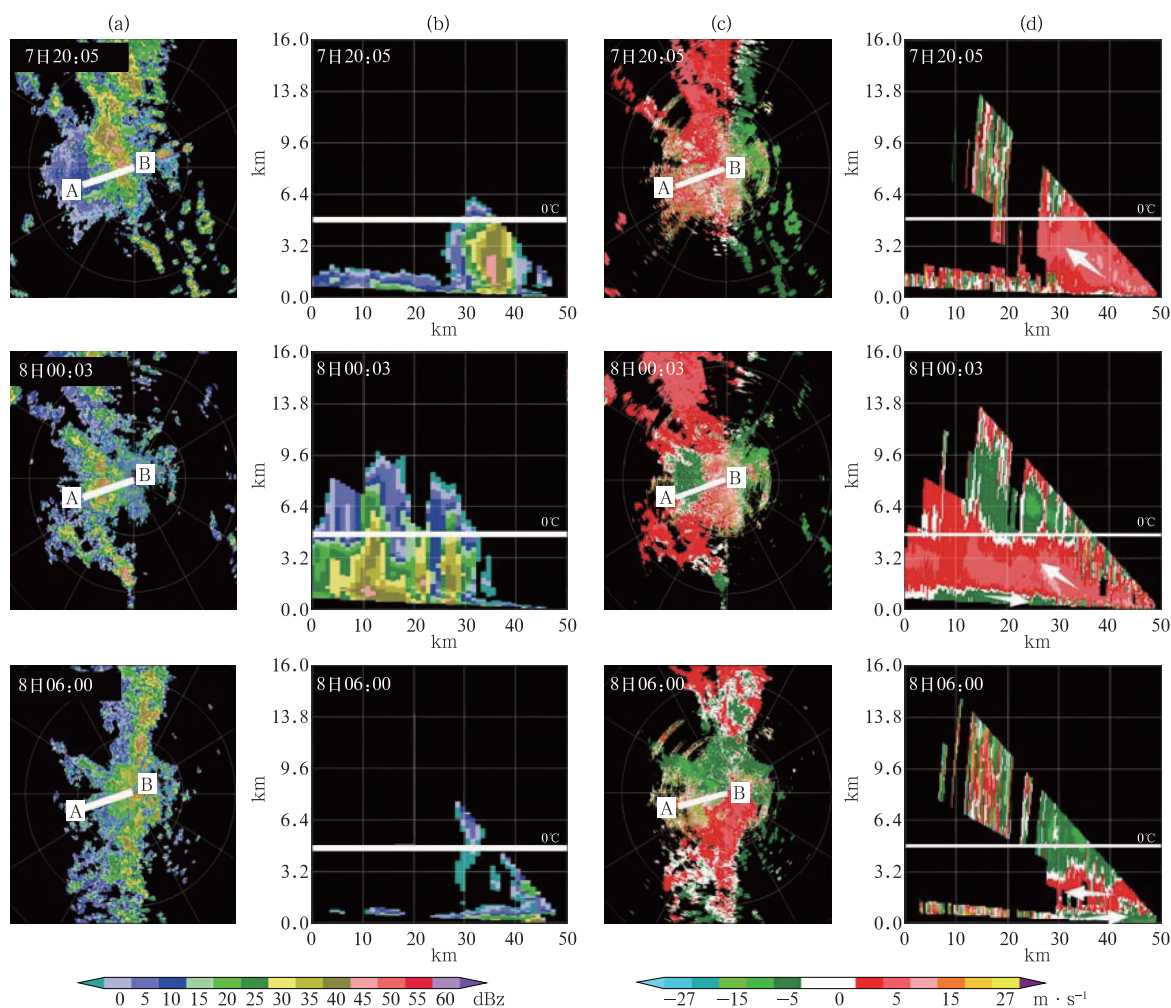
Fig. 10 (a) Composite reflectivity of convective rainband and (b) cross-section of reflectivity factor across the rainband, (c) radial velocity at  $0.5^{\circ}$  elevation and (d) cross-section of radial velocity across the rainband related to train effect from 14:59 BT to 23:09 BT 9 August 2015

9 日 18:00(图 10),风速超  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的东南急流进一步向上扩展至 6 km 以上,与来自雨带内部丘陵上空冷池的东南气流之间形成自地面伸展至 5 km 高度并向西倾斜的深厚辐合带;5 km 以上高度表现为明显的辐散区,在有利的高低层风场配置下对应距离地面 1.5~2 km 处的反射率因子已迅速加强至 55 dBZ。低质心、高强度的回波特征有利强降水形成(俞小鼎等,2006)。10 日 02:05,距地 5 km 高度以上风向顺转为一致西南西风,东南急流核高度降至 3 km 以下(图略);由 10 日 02:05 剖面(图 10)可见,东南和西南气流之间的辐合结构基本消失,转为一致东南风;强回波高度明显下降,雨带趋于松

散。

过程 2:2013 年 10 月 7 日 20:05,浙江沿海上空 5.5 km 以下存在深厚的东南东气流,风速在  $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。由雨带反射率因子和径向速度剖面(图 11)可见,此时强度超 30 dBZ 的回波高度发展达到 5 km 高度,45 dBZ 以上回波质心高度位于 1~2 km。较强回波均处于  $0^{\circ}\text{C}$  层以下,以低质心暖云降雨为主。8 日 00:03(图 11),雨带内部出现来自弱冷池的偏西风,并与沿海偏东气流之间形成一条长度约 50 km 的南北向辐合区,高度集中在 1.5 km 以下,相较“苏迪罗”登陆后列车效应过程明显偏低(图略)。强度 30 dBZ 以上的降水回波主要分布在





注:图 a,c 中直线 AB 为剖面位置,图 b,d 中白色横线为 0°C 层高度,图 d 中箭头为气流方向。

图 11 2013 年 10 月 7 日 20:05 至 8 日 06:00(a,c)列车效应对流雨带雷达(a)组合反射率因子与(c)0.5°仰角径向速度,(b,d)沿雨带横切面的(b)反射率因子与(d)径向速度垂直剖面

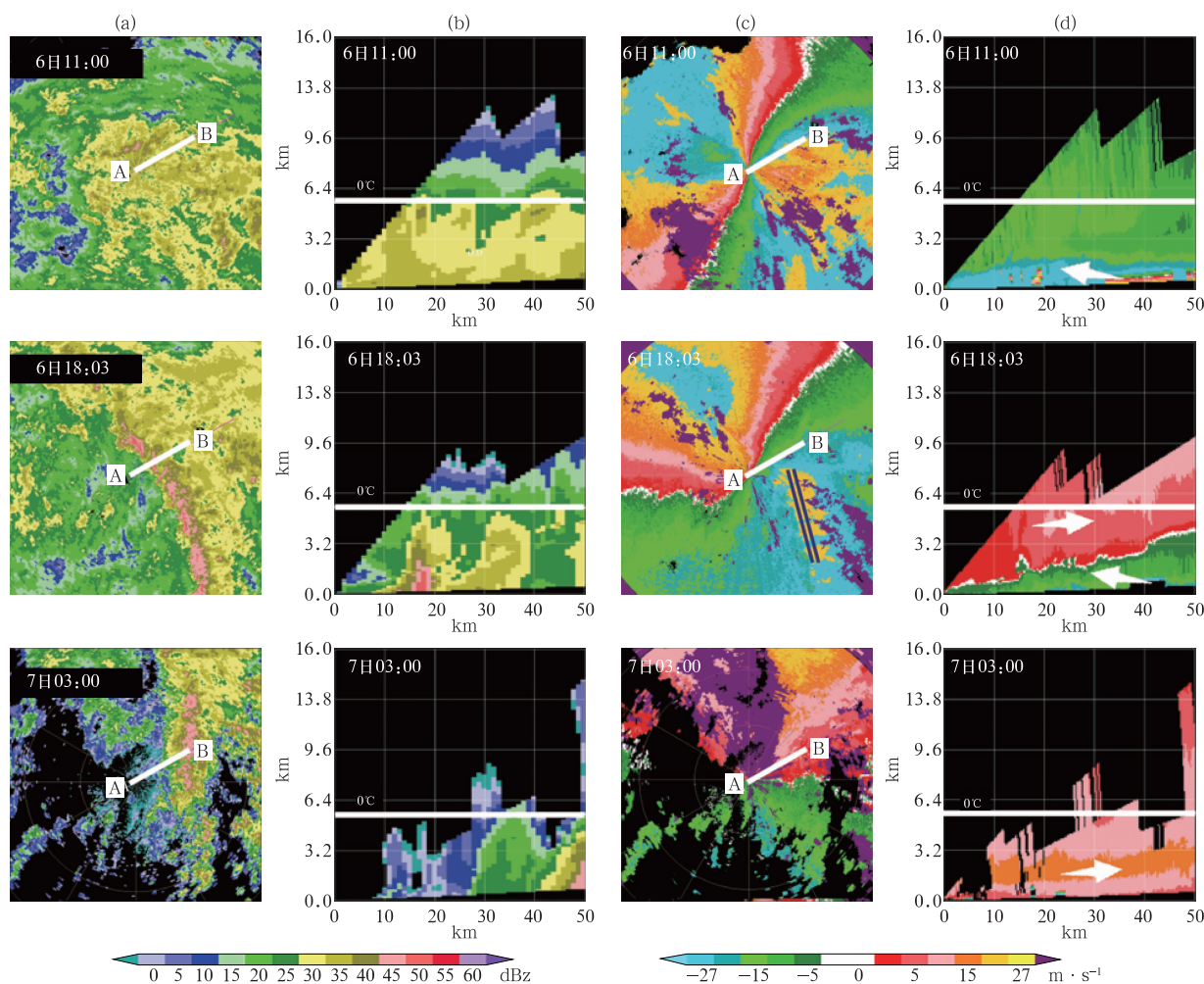
Fig. 11 (a) Composite reflectivity of convective rainband and (b) cross-section of reflectivity factor across the rainband, (c) radial velocity at 0.5° elevation and (d) cross-section of radial velocity across the rainband related to train effect from 20:05 BT 7 to 06:00 BT 8 October 2013

3.2 km 以下;辐合区两侧风速都在  $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风速数值相当的偏东风和偏西对峙,造成辐合带较稳定的维持,雨带停滞少动。8 日 05:00 (图 11), 3.4 km 高度以上环境风转为一致西南风,地面至 0.6 km 高度转为一致西北风,辐合风场结构消失,雨带东退。

过程 3:由 2005 年 8 月 6 日 11:00 台风麦莎本体螺旋雨带反射率因子剖面(图 12)可见,雨带回波强度总体在 30~40 dBz,回波发展高度低于 0°层,为较典型热带海洋降雨。同时次速度剖面表明,雨带处于一致的强东南风中,0.5°仰角速度场存在大范围速度模糊区,东南风风速中心在  $45 \sim 50 \text{ m} \cdot$

$\text{s}^{-1}$ 。6 日 18:03(图 12),主雨带加强,整体结构略向外倾斜。反射率因子超 50 dBz 带状区域成东南—西北走向的,发展质心高度集中在 0~2 km。径向速度图上,雷达原点西侧大范围偏南风 and 东侧东南风之间形成风场切变,其中切变线右侧东南风的中心风速减弱至  $39 \sim 46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。主雨带所在处平均径向速度表现出急流的脉动(图 12c 黑色双实线),暴雨中心宁波北仑春晓街道位于东南大风速核下游,3 km 高度以上风向顺转为偏南风。7 日 03:00 雨带强度维持,随着整层风向转南西南,雨带北抬东移入海。

综上所述,来自冷池的偏西风分量与来自海面



注:图 a、c 中直线 AB 为剖面位置,图 b、d 中白色横线为 0°C 层高度,图 c 中黑色双实线为急流脉动,图 d 中箭头为气流方向。

图 12 2005 年 8 月 6 日 11:00 至 7 日 03:00(a,c)列车效应对流雨带雷达(a)组合反射率因子与(c)0.5°仰角径向速度,(b,d)沿雨带横切面的(b)反射率因子与(d)径向速度垂直剖面  
Fig. 12 (a) Composite reflectivity of convective rainband and (b) cross-section of reflectivity factor across the rainband, (c) radial velocity at 0.5° elevation and (d) cross-section of radial velocity across the rainband related to train effect from 11:00 BT 6 to 03:00 BT 7 August 2005

的偏东气流之间形成的辐合是台风外围中尺度对流雨带列车效应(过程 1、过程 2)发展与维持的重要因素,其中“苏迪罗”与副热带高压之间的对流雨带(过程 1)辐合层次深、对流发展高,同时存在冰相和暖云降水过程。相比而言,过程 3“麦莎”内核区主雨带对流发展高度低,为典型海洋降水,结构随高度略向外侧倾斜,雨带所在低仰角径向速度存在急流风速脉动造成的队列状速度模糊区。

#### 4 结论与讨论

本文在研究通过多次台风雨带列车效应导致极

端降水事件中揭示列车效应形成的可能方式及其相应的流型配置,为台风雨带列车效应导致的极端降雨的短时临近预报提供线索。2015 年第 13 号台风苏迪罗、2013 年第 23 号台风菲特和 2005 年第 9 号台风麦莎登陆华东沿海后强度迅速减弱期间,浙东丘陵东侧迎风坡区域均出现雨带列车效应特征,水汽通量辐合层次低。相似的三次线状中尺度对流雨带发展过程具有截然不同的环境背景场。列车效应特征在台风环流与副热带高压之间、两个台风环流之间的外围对流雨带中以及台风本体内部的螺旋雨带中均可发生,其中外围对流雨带的发展须具备中等偏强的对流有效位能和垂直风切变。

进一步分析中小尺度热力特征发现,尽管在流型配置方面的差异巨大,但当触发新单体生成的近地层中小尺度锋区、切变线或辐合线的走向与环境背景气流平行时,不论对流单体是否沿着雨带长轴移动,都可引发列车效应现象。而这种中小尺度系统有时由台风环流在丘陵地形抬升持续降雨而产生的冷池、与沿海平原温暖潮湿海风之间形成的准静止中尺度锋区引起,从而在力管项作用下在边界暖的一侧不断激发新单体生成;有时由台风内核区的低空急流风速脉动和风场切变线造成的风向、风速辐合引起,为台风本体螺旋雨带对流单体加强发展提供有利动力条件。

台风雨带列车效应暴雨形成方式的多样性给相应的暴雨短时临近预报带来了巨大挑战。一方面,可以继续遵循“流型配置”的思路(许爱华等,2014;孙继松等,2014),研究更多的例子,分成几种类型,对于同一种台风雨带列车效应暴雨类型,提出适当的短时临近预报思路;另一方面,可以从“基于构成要素的预报方法”(Doswell III et al,1996;俞小鼎,2011)出发,采取不分类而只关注构成要素,如台风动力学、低空急流、地形、台风雨带与其他系统的相互作用,以及对流有效位能和垂直风切变等重要环境参数;不过这方面尚未形成明确的思路和可操作性强的方案,Corfidi et al(1996)和 Corfidi(2003)的研究可带来一些启示。

## 参考文献

- 陈明轩,王迎春,肖现,等,2013.北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理[J].气象学报,71(4):569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012[J]. Acta Meteor Sin, 71(4):569-592(in Chinese).
- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 范元月,罗剑琴,张家国,等,2020.宜昌极端短时强降水中尺度对流系统特征分析[J].气象,46(6):776-791. Fan Y Y, Luo J Q, Zhang J G, et al, 2020. Characteristics analysis of mesoscale convective system causing the extreme flash rain in Yichang[J]. Meteor Mon, 46(6):776-791(in Chinese).
- 何立富,陈双,郭云谦,2020.台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因[J].应用气象学报,31(5):513-526. He L F, Chen S, Guo Y Q, 2020. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019[J]. J Appl Meteor Sci, 31(5):513-526(in Chinese).
- 何群英,解以扬,东高红,等,2011.海陆风环流在天津 2009 年 9 月 26 日局地暴雨过程中的作用[J].气象,37(3):291-297. He Q Y, Xie Y Y, Dong G H, et al, 2011. The role of sea-land breeze circulation in local convective torrential rain happening in Tianjin on 26 September 2009[J]. Meteor Mon, 37(3):291-297(in Chinese).
- 胡雅君,张伟,赵玉春,等,2020.“5·7”闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析[J].气象,46(5):629-642. Hu Y J, Zhang W, Zhao Y C, et al, 2020. Mesoscale feature analysis on a warm-sector torrential rain event in southeastern coast of Fujian on 7 May 2018[J]. Meteor Mon, 46(5):629-642(in Chinese).
- 黄小玉,陈江民,叶成志,等,2010.“碧利斯”引发湘东南特大暴雨的多普勒雷达回波特征分析[J].大气科学学报,33(1):7-13. Huang X Y, Chen J M, Ye C Z, et al, 2010. Analysis of the torrential rain in southeastern Hunan caused by the Severe Tropical Storm Bilis using Doppler radar data[J]. Trans Atmos Sci, 33(1):7-13(in Chinese).
- 柯文华,俞小鼎,林伟旺,等,2012.一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究[J].气象,38(5):552-560. Ke W H, Yu X D, Lin W W, et al, 2012. The analysis of the heavy rainstorm caused by “Train Effect”[J]. Meteor Mon, 38(5):552-560(in Chinese).
- 娄小芬,马昊,黄旋旋,等,2020.台风“利奇马”造成浙江极端降水的成因分析[J].气象科学,40(1):78-88. Lou X F, Ma H, Huang X X, et al, 2020. Analysis on the causes of extreme precipitation by Typhoon “Lekima” (1909) in Zhejiang Province[J]. J Meteor Sci, 40(1):78-88(in Chinese).
- 青泉,赵静,叶儒辉,2015.夏季四川盆地强降雨列车效应特征[J].气象科技,43(2):250-260. Qing Q, Zhao J, Ye R H, 2015. Characteristic analysis of train effects of summer heavy precipitation in Sichuan Basin[J]. Meteor Sci Technol, 43(2):250-260(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M].北京:气象出版社:282. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Fundamental and Technical Method of Severe Convection Prediction in Middle and East China: Handbook of China Severe Convection Prediction [M]. Beijing: China Meteorological Press:282(in Chinese).
- 孙继松,何娜,郭锐,等,2013.多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J].大气科学,37(1):137-148. Sun J S, He N, Guo R, et al, 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms[J]. Chin J Atmos Sci, 37(1):137-148(in Chinese).
- 孙继松,何娜,王国荣,等,2012.“7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,31(3):218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al, 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torr Rain Dis, 31(3):218-225(in Chinese).
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等,2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].气象,38(10):1267-1277.



- Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteor Mon, 38(10): 1267-1277 (in Chinese).
- 孙素琴, 郑婧, 支树林, 等, 2015. 一次由“列车效应”引发的梅雨锋暴雨研究[J]. 高原气象, 34(1): 190-201. Sun S Q, Zheng J, Zhi S L, et al, 2015. Analysis of a Meiyu-front rainstorm caused by ‘train effect’ [J]. Plateau Meteor, 34(1): 190-201 (in Chinese).
- 陶祖钰, 1980. 湿急流的结构及形成过程[J]. 气象学报, 38(4): 331-340. Tao Z Y, 1980. The structure and formation of the moist jet stream [J]. Acta Meteor Sin, 38(4): 331-340 (in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 44(4): 469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017 [J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484 (in Chinese).
- 吴涛, 张家国, 牛奔, 2017. 一次强降水过程涡旋状 MCS 结构特征及成因初步分析[J]. 气象, 43(5): 540-551. Wu T, Zhang J G, Niu B, 2017. Preliminary analysis of structure characteristics and causes for heavy-rain-producing vortex-shaped MCS [J]. Meteor Mon, 43(5): 540-551 (in Chinese).
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等, 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. Meteor Mon, 40(4): 400-411 (in Chinese).
- 薛煜, 李靓靓, 朱业, 等, 2021. 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, 45(2): 379-392. Xue Y, Li L L, Zhu Y, et al, 2021. Analysis of characteristics and formation of “train effect” in the spiral cloud belts of Typhoon “Fitow” (No. 1323) [J]. Chin J Atmos Sci, 45(2): 379-392 (in Chinese).
- 杨春, 湛芸, 方之芳, 等, 2009. “07.6”广西柳州极端暴雨过程的多尺度特征分析[J]. 气象, 35(6): 54-62. Yang C, Chen Y, Fang Z F, et al, 2009. Multi-scale characteristics analysis of Liuzhou severe heavy rainfall in June, 2007 [J]. Meteor Mon, 35(6): 54-62 (in Chinese).
- 杨磊, 蒋大凯, 王瀛, 等, 2017. “8·16”辽宁特大暴雨多尺度特征分析[J]. 干旱气象, 35(2): 267-274. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al, 2017. Analysis on multi-scale characteristics of a torrential rainstorm in Liaoning Province on 16 August 2013 [J]. J Arid Meteor, 35(2): 267-274 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2011. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. 气象, 37(8): 913-918. Yu X D, 2011. Ingredients based forecasting methodology [J]. Meteor Mon, 37(8): 913-918 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11): 1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012 [J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3): 202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Torr Rain Dis, 32(3): 202-209 (in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社: 216-217. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press: 216-217 (in Chinese).
- 郑铮, 潘灵杰, 钱燕珍, 等, 2021. 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, 39(2): 269-278. Zheng Z, Pan L J, Qian Y Z, et al, 2021. Evolution characteristics of extreme heavy precipitation in coast of Zhejiang Province caused by Typhoon Lekima [J]. J Arid Meteor, 39(2): 269-278 (in Chinese).
- Chappell C F, 1986. Quasi-stationary convective events [M] // Ray P S. Mesoscale Meteorology and Forecasting. Boston: American Meteorological Society: 289-309.
- Corfidi S F, 2003. Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs [J]. Wea Forecasting, 18(6): 997-1017.
- Corfidi S F, Meritt J H, Fritsch J M, 1996. Predicting the movement of mesoscale convective complexes [J]. Wea Forecasting, 11(1): 41-46.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology [J]. Wea Forecasting, 11(4): 560-581.
- Peters J M, Schumacher R S, 2015. Mechanisms for organization and echo training in a flash-flood-producing mesoscale convective system [J]. Mon Wea Rev, 143(4): 1058-1085.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 133(4): 961-976.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2008. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood [J]. Mon Wea Rev, 136(10): 3964-3986.
- Schumacher R S, 2009. Mechanisms for quasi-stationary behavior in simulated heavy-rain-producing convective systems [J]. J Atmos Sci, 66(6): 1543-1568.

(本文责编: 何晓欢)