

文章编号: 2096-1618(2025)02-0170-09

# 华南前汛期一次双雨带降水过程分析研究

郭照华<sup>1</sup>, 谌芸<sup>2,1,3</sup>, 肖天贵<sup>1</sup>, 曾智琳<sup>4</sup>, 蔡景就<sup>4</sup>, 于承源<sup>5</sup>

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 4. 广东省气象台, 广东 广州 510640; 5. 安徽大学纽约石溪学院, 安徽 合肥 230039)

**摘要:**为加深华南前汛期双雨带形成机理的科学认识,利用国家级和区域自动站逐小时观测资料、阳江和清远探空资料、多普勒天气雷达组网产品、广州双偏振天气雷达基数据及 ERA5 再分析资料,采用湿位涡诊断等方法,分析 2022 年 5 月华南一次双雨带过程的环境条件及形成机制。结果表明:(1)两条雨带均发生在高湿与层结不稳定的中尺度对流环境中,但北雨带为低涡切变线和锋面等天气系统协同强迫形成的大尺度锋面雨带,强降水落区集中,具有一定的对流性质;南雨带在弱天气尺度强迫背景下产生,对流性质更强,具有极端性。(2)对流不稳定是北雨带发展的重要机制,低层 MPV1<0 且 MPV2>0 对应强降水落区,较强的大气斜压性有利于低涡发展。(3)南雨带夜间东南暖湿气流增强,海陆边界和地形抬升促使气流发生侧向摩擦,触发阳江的初始对流,中等偏弱的深层垂直风切变和  $\gamma$  中尺度涡旋有助于对流组织化;台山-中山在地面气旋式切变和地形抬升下触发初始对流,配合较弱的冷池出流和温度梯度,有助于对流系统的维持。(4)与北雨带相关的水汽输送来源于 700 hPa 附近,南雨带的水汽输送来源于 850~925 hPa。双雨带之间的弱雨区可能与低空西南急流的位置、中层下沉气流以及低层辐散等因素有关。

**关键词:**华南双雨带;锋面;气旋式切变;湿位涡;对流触发

**中图分类号:** P458.1+21.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.02.008

## 0 引言

长期业务预报发现,华南前汛期(4~6月)在特定环流背景下存在一种“双雨带”现象,即华南北部有大尺度锋面雨带(北雨带)活动时,沿海有时同时形成暖区线状对流雨带(南雨带)<sup>[1]</sup>。相较于北雨带,南雨带发生在弱天气尺度强迫背景,往往容易忽视,且具有很强的突发性和极端性,降水落区和强度可预报性差<sup>[2-3]</sup>。目前,无论是中国全球同化预报系统(CMA-GFS)、欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)、美国国家环境预报中心(national centers for environmental prediction, NCEP)等提供的全球确定性数值模式,还是中国高分辨率区域中尺度模式(CMA-MESO、CMA-GD 和 CMA-SH 等)对双雨带的预报能力仍相当有限,给预报带来极大挑战,因此开展双雨带研究工作十分必要。

20 世纪 70 年代以来,中国开展多次华南前汛期暴雨外场观测实验,在对流触发和维持机制、极端强降水事件形成机理等取得许多有价值的成果<sup>[4-5]</sup>。大量研究指出南海夏季风、低空急流、海岸地形、海陆边界效应、山谷风效应、中尺度辐合线和冷池等是暴雨发生的重要因素<sup>[6-7]</sup>。由于华南地形多样,对暴雨的作用更复杂,因此学者开展一系列数值模拟实验,证实暴雨多发生在山地迎风坡、气流汇合的山谷和喇叭口地形<sup>[8-10]</sup>。

局地中尺度地形增强气流的辐合抬升,一方面容易形成南风风速辐合和地面中尺度辐合线,动力抬升加强;另一方面有利于暴雨发生,对降水量起增幅作用<sup>[11]</sup>。造成华南沿海暴雨多是由多个有组织性的  $\beta$  中尺度系统触发<sup>[12]</sup>,强降水释放的凝结潜热在对流发展、组织化和维持过程中极其重要,它与维系对流系统强度形成正反馈机制,在雨滴的拖曳下沉和蒸发冷却作用下形成的冷池出流边界进一步维持和加强对流辐合并释放暖湿不稳定能量,表现为回波的列车效应和后向传播等特征,从而产生局地的极端降水事件<sup>[13]</sup>。

现有双雨带研究集中在江淮梅雨锋暴雨和华南暴雨,指出北雨带以对称不稳定机制维持对流运动,南雨带则是以湿对称不稳定机制来维持<sup>[14-16]</sup>。林晓霞等<sup>[17]</sup>研究华南一次双雨带热动力特征表明,对流不稳定是锋面雨带和暖区线状对流雨带共同的发展机制。湿位涡是大气热力、动力和水汽信息的综合诊断物理量,并提供不稳定判别方法,揭示强降水发展机制,被广泛应用于暴雨、台风等天气过程<sup>[18-19]</sup>,中国已有不少研究采用湿位涡守恒理论对暴雨等对流性天气的形成和发展进行诊断,在中尺度天气分析中有一定的应用价值<sup>[20-22]</sup>。

2022 年 5 月在华南北部有大尺度锋面雨带活动背景下,沿海发生较强的线状对流雨带,二者均产生强降水。数值模式对此次降水过程的有无具有较好的可预报性,但对于双雨带特征及落区的预报效果并不理想。预报员主观预报能整体把握双雨带的落区及强度,然而局地的极端暴雨和弱雨区的形成等精细化特征仍是预

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42475015, 41975001, 52239006)

通信作者: 谌芸. E-mail: chenyun@ cma. gov. cn

报中的不足。因此,本文首先分析双雨带的降水特征和环境条件,然后采用湿位涡诊断方法探讨北雨带的发展机制,并从地面中尺度特征角度分析南雨带对流触发机制和组织化演变特征,最后探讨双雨带间弱雨区的可能成因,以期加深华南双雨带形成机理的科学认识,为今后华南双雨带预报提供有价值的参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

资料包括高空与地面常规、非常规观测资料以及欧洲中期天气预报中心提供的第五代大气再分析资料(ERA5)。常规和非常规观测资料为国家级和区域加密自动站逐小时观测及降水资料、多普勒天气雷达组网产品和广州双偏振天气雷达基数据,用于降水统计和地面中小尺度特征分析;高空观测资料采用广东阳江站和清远站探空数据,用于中尺度对流环境分析。ERA5 空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为1 h,垂直方向有37层,用于环流背景分析与形成机制诊断。

1.2 湿位涡的诊断方法

湿位涡(MPV)综合表征大气运动的水汽、热力和动力属性,能全面有效地描述暴雨的发生发展。在 $P$ 坐标系中绝热无摩擦的饱和大气,MPV 具有守恒性,并假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多,即忽略垂直速度的水平变化,其表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{MPV} &= -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) = \text{MPV1} + \text{MPV2} \\ \text{MPV1} &= -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \\ \text{MPV2} &= g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

式中, $\zeta_p$ 为 $P$ 坐标系下的垂直涡度分量, $f$ 为地转涡度或科氏参数, $\theta_e$ 为相当位温。MPV1 和 MPV2 分别为

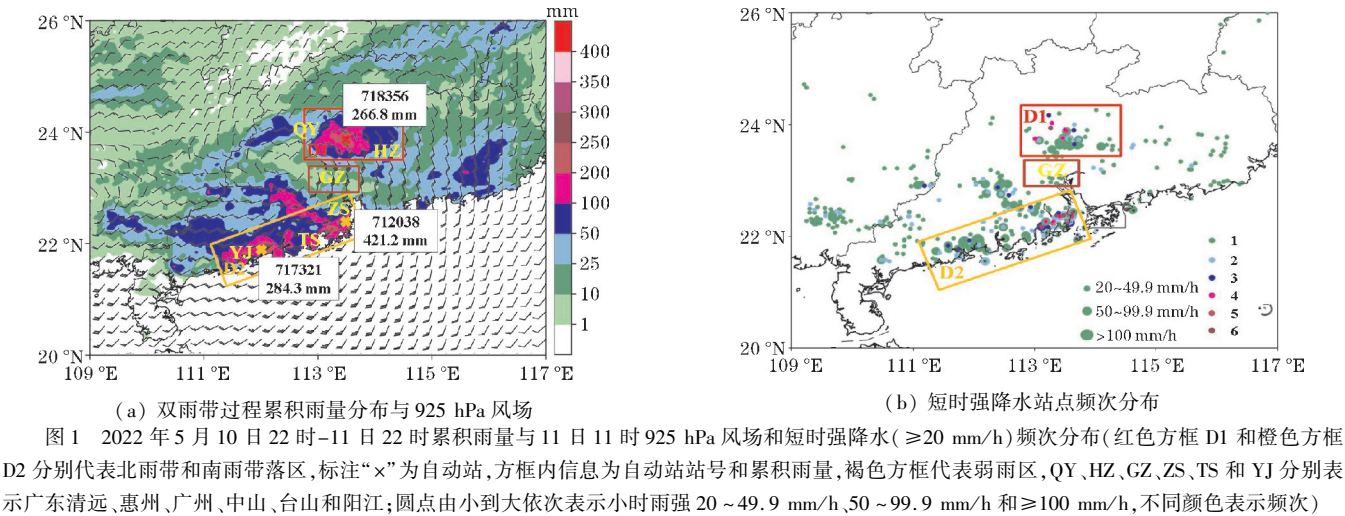
湿正压项和湿斜压项,分别反映对流稳定性和大气斜压性强弱<sup>[23]</sup>,单位为 $\text{m}^{-2} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。湿位涡提供不稳定判别机制:  $\text{MPV1} < 0$ , 则  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ , 大气为对流不稳定,反之为对流稳定;  $\text{MPV2}$  与  $\theta_e$  面倾斜有关,可以反映对流不稳定系统所引起的湿斜压对称不稳定<sup>[17]</sup>。

2 双雨带的降水特征与环境条件

2.1 降水分布特征

由图 1(a)可见,华南北部和沿海形成两条强降雨带,相距约300 km,分别为925 hPa切变线和低涡相联系的大尺度锋面雨带(北雨带 D1)和沿海暖区线状对流雨带(南雨带 D2),双雨带之间存在弱雨区(广州,褐色方框 GZ)。北雨带主要位于清远—惠州北部,呈东南东—西北西走向,落区与925 hPa低涡东侧急流辐合区和切变线基本对应,共有 16 个站点的累积雨量超过100 mm,最大266.8 mm。南雨带位于阳江—中山,雨区紧贴海岸线并与之平行,落区分布更广,累积雨量更大,共有 95 个站点累积雨量超过100 mm,存在两个特大暴雨落区(阳江、台山—中山),两地最大累积雨量分别为284.3 mm和421.2 mm。

连续的短时强降水(小时降水量 $\geq 20 \text{ mm/h}$ )可在短时间内得到较大的累积雨量,主要由小时雨强和持续时间确定<sup>[24]</sup>。由图 1(b)可见,清远佛冈附近与珠江口西侧沿岸发生频率较高,并与强降水落区高度重合。北雨带短时强降水呈团块状分布,频次多在4次以下,雨强以 $20 \sim 49.9 \text{ mm/h}$ 为主,最大80.3 mm/h;南雨带短时强降水呈带状沿海岸线分布,50 mm/h以上雨强和发生频次更突出,其中有4个站点雨强超过100 mm/h,最大123.6 mm/h,可见沿海的降水强度具有一定极端性。





小时时间尺度的降水观测更能反映精细化演变特征<sup>[25]</sup>,由图2可知,南雨带代表站点累积雨量均大于北雨带,阳江阳东的降水开始时间稍早(10日22时),前期小时雨强不足5 mm/h,11日04时降水强度迅速增强,05-06时雨强分别为117.5 mm/h和90.2 mm/h,极短时间内累积雨量陡增,短时强降水持续4 h(04-07时),可见强降水突发性强、对流性质极为显著。南雨带另一强降水中心为中山三乡,降水演变具有明显的阶段性和波动性(11日0-12时),连续6 h发生短时强降水(05-10时),07-08时雨强分别为59.4 mm/h和59 mm/h,是长时间的短时强降水累积得到最大累积雨量的结果。北雨带清远佛冈的主要降水开始时间最晚(11日05时),过程降水量虽然不及南雨带,但雨强峰值80.3 mm/h(12时)显著强于中山三乡,对流性更强,并连续5 h出现短时强降水(10-14时)。综上所述可知,相较于北雨带,南雨带突发性更强,对流性质更明显,降水强度具有极端性。

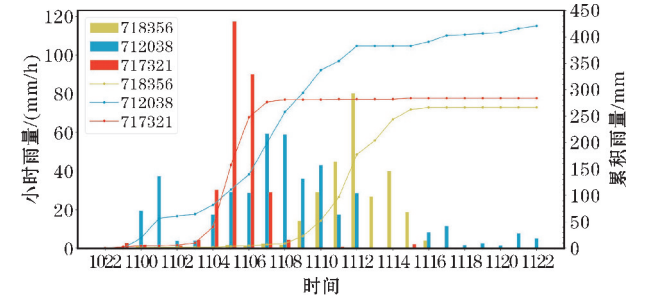


图2 10日22时-11日22时广东省清远市佛冈县(718356)、广东省中山市三乡镇(712038)、广东省阳江市阳东区(717321)逐小时雨量(柱状)与累积雨量(折线)随时间演变序列

2.2 环流背景和中尺度环境条件

基于ERA5再分析资料,提炼此次双雨带过程的多尺度背景与条件(图3)。双雨带发生前(10日夜间),华南处于南压高压中心东侧的扇形分流辐散区,沿海处于高空辐散气流大值区,同时位于500 hPa高空槽底部,持续受短波槽东移下滑影响。11日白天,随

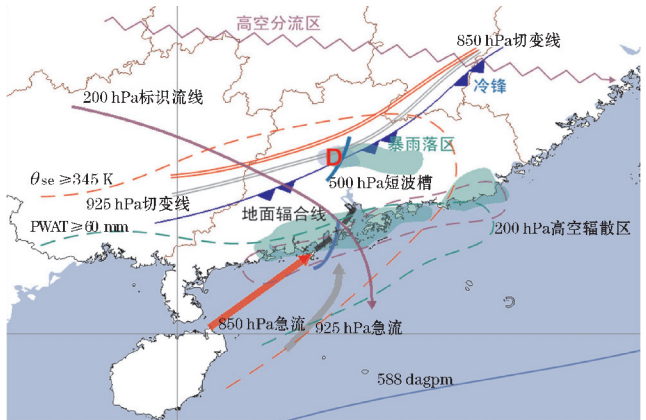
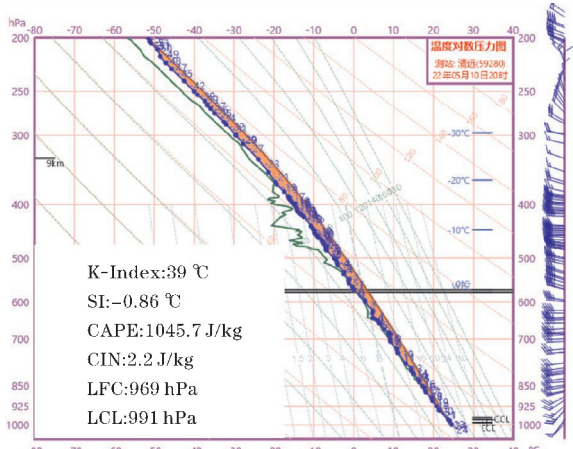


图3 华南双雨带过程多尺度背景场

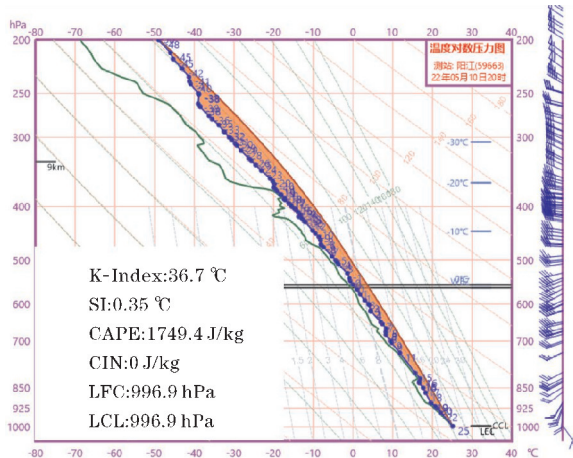
着低空低涡切变线和锋面南压至华南北部,伴有明显的温度梯度,华南处于850 hPa假相当位温 $\theta_{se} \geq 345$  K高能舌,锋前受低空急流( $\geq 12$  m/s)影响,低槽区的整层可降水量超过60 mm。因此,此次过程是南亚高压外围强烈的西北辐散气流、短波槽、低空切变线、低涡和锋面等多个高低空系统协同作用下的结果。

由双雨带发生前(10日20时)北雨带(清远)和南雨带(阳江)的探空曲线可见(图4),500 hPa以下温度和露点曲线接近,表明中低层水汽充沛,湿层深厚。暖云层厚度分别为4.6 km和4.9 km,远高于珠江三角洲地区发生重大短时强降水事件的平均暖云层厚度4.1 km<sup>[26]</sup>,二者风场随高度顺转,表明均有暖平流输送,但垂直风切变较弱。阳江的自由对流高度(LFC)和抬升凝结高度(LCL)比清远更低,对流有效位能(CAPE)更大,因此南雨带的对流更易被触发。

综上,两地均具备高湿与层结不稳定等对流触发的有利形势。然而,北雨带有低涡切变线、锋面等系统配合,动力抬升条件清晰。南雨带距离这些系统仅有200~300 km,不受直接影响也产生强降水。可见双雨带对流的触发和维持机制成因不同。



(a) 10日20时清远探空曲线



(b) 10日20时阳江探空曲线

图4 双雨带代表站点探空曲线

3 双雨带的形成机制分析

3.1 北雨带的湿位涡结构

分析不同等压面的湿位涡结构发现,11 日 0 时南雨带降水发生前后(图 5a),南雨带 975~1000 hPa MPV<0, MPV1<-0.4×10<sup>-5</sup> m<sup>-2</sup>·K·s<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>和 MPV2>0.5×10<sup>-6</sup> m<sup>-2</sup>·K·s<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>。06 时南雨带降水达到最强(图 5b),975~1000 hPa MPV 稍有增强,MPV1 和 MPV2 的变化不大,此时北雨带降水逐渐展开,MPV2 正值区向内陆倾斜。13 时北雨带最强时段(图 5c),湿位涡结构发生明显变化,850~950 hPa 为 MPV 和 MPV1 低值区,MPV1 最小值可达到-0.8×10<sup>-5</sup> m<sup>-2</sup>·K·s<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>,同时 MPV2>0,表明该地为对流不稳定区,对流形成高度较

低,容易发生强降水,对应北雨带降水进入最强时段。此外,22°N~24°N 低层 MPV2>0,呈舌状向北倾斜,与低空急流加强北推相符合。16 时,随着北雨带低层 MPV1 强度减弱(图 5d),大气转为弱对流不稳定,对应低涡东移减弱,降水强度减小。

以上分析可知,北雨带强降水落区是湿位涡结构变化最明显的区域,低涡的形成导致降水对流性质增强。因而,北雨带低层的湿位涡变化具有更好的指示意义,对流不稳定是其发生的重要机制。MPV2 正值区增强并向华南北部延伸是低空急流加强北推的示踪器,同时 MPV2 长时间处于异常正值大值区且梯度较大,表明大气斜压性强,有利于低涡的生成和发展。需要指出的是,湿位涡诊断对南雨带降水的指示效果有限,可能是南雨带的触发和形成过程未必能满足绝热无摩擦条件,其垂直速度水平变化也不会小。

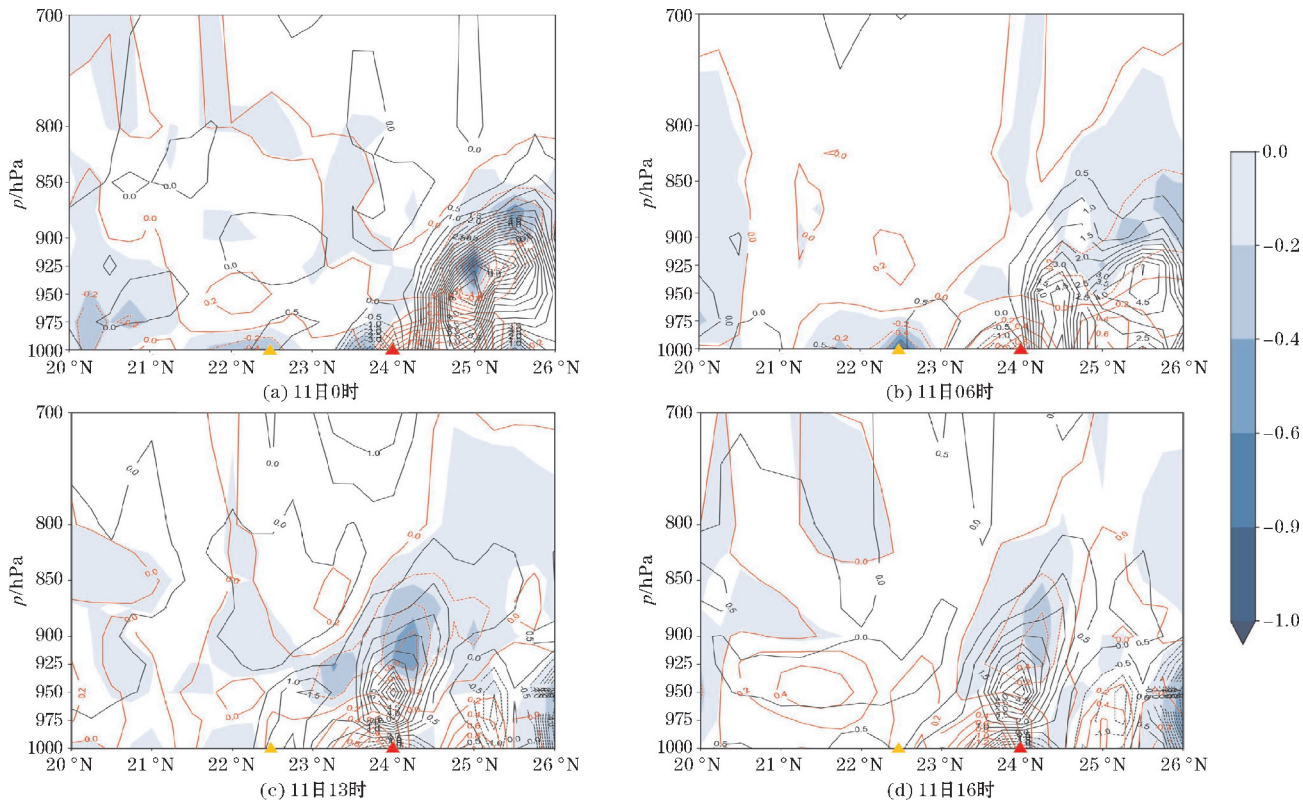


图 5 沿 113.5°E 湿位涡垂直剖面(填色区为 MPV,红色等值线为 MPV1,黑色等值线为 MPV2,实线为正值区,虚线为负值区;橙色和红色三角形分别为南、北雨带强降水中心)

3.2 南雨带对流触发发展与地面中尺度特征

南雨带紧贴海岸线狭长分布,最强降水落区分布较广(阳江、台山—中山),这与该地区不同的对流触发机制有关。10 日 22 时-11 日 0 时(图 6a~d),阳江受前期降水(图略)和地形的共同影响,内陆气温低于沿海,温差约 1℃~2℃,云雾山和天露山为冷池中心,地面增强的东南暖湿气流深入内陆,在冷池和地形共同作用下持续有对流触发,雨强小于 10 mm/h。值

得关注的是,阳江沿海气温 25℃~26℃,探空显示 LFC 为 996.9 hPa,LCL、LFC 及对流凝结高度(CCL)的温度均为 25.1℃,沿海气温基本达到该温度值,部分地区已经出现降水,因此对流初生可能受地面非均匀加热性质的影响。其次,沿海分布有鹅凰嶂山、龙高山和紫罗山,LFC 极低,较大程度上直接受山脉的正面阻挡抬升而触发初始对流,山上气温与低海拔相差约 1℃,然而地面观测并未发现有明显吹向河谷的山风,可以推断初始对流的启动与山谷风环流无明显联系。



此外,22时地面风场显示(图6a),从沿海到山脉迎风坡,风向由东南风(4 m/s左右)转为偏东风(2 m/s左右),表现为明显的气旋性弯曲,可见存在较弱的水平风切变;10日23时-11日0时(图6c~d)阳江沿海东南气流增强至6 m/s左右,风场维持气旋性弯曲特点,水平风切变略有增强。因此,在下垫面性质发生改变时,中尺度地形产生的侧向摩擦差异导致海陆边界风向发生旋转,水平风切变有助于山前正涡度的发展(图6b),增强对流触发的可能性。

另一强降水落区位于台山—中山,10日22时

(图6a),冷池中心位于狮子头山,狮子头山—五桂山南侧为东南风(2~4 m/s),北侧为东北风(2 m/s左右),两侧形成地面气旋式切变,地面增强的东南暖湿气流与山的走向(西南—东北向)近似垂直,地形的正面阻挡使东南风强迫逆转为偏东风,形成局地的地面垂直涡度中心(图6b),在迎风坡的抬升作用下开始触发对流,但降水强度较弱;10日23时-11日0时(图6c~d),气旋式切变维持,其西南侧持续有对流孤立零散地触发,并沿着气旋式切变向东传播,南雨带降水逐渐发展增强。

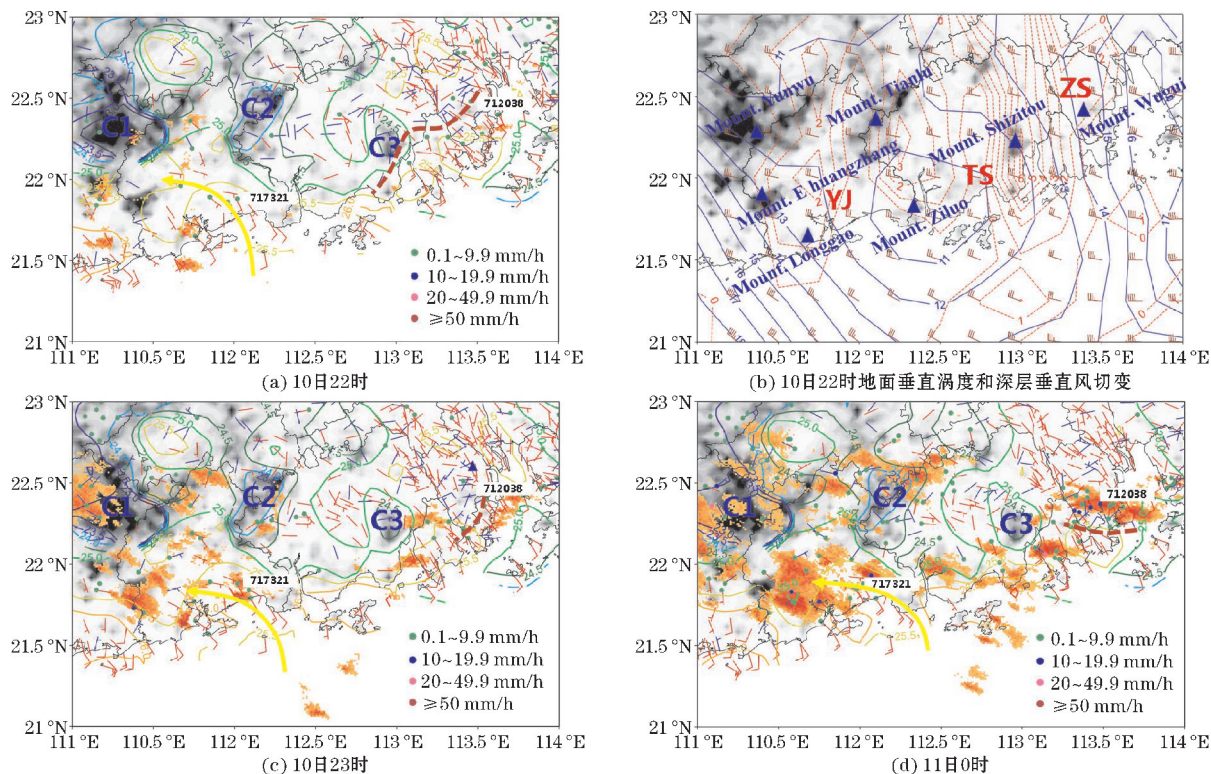


图6 10日22时-11日0时的地面风场、温度场、小时雨强和雷达组合反射率图

南雨带不同区域的对流组织化及维持机制也各有差异。11日03时地面风场可见(图7a),阳江沿海风场仍保持气旋性弯曲特征,偏南风由6 m/s增至8~10 m/s,对流发展旺盛,回波最大强度达55~60 dBZ,对流处于组织化过程。大量研究证实垂直风切变是决定对流系统的类型、形态、结构的关键因素,同时也是维系对流组织化的重要条件<sup>[27-28]</sup>。从03时深层(0~6 km)垂直风切变和地面垂直涡度可以看出(图7b),珠江口以西的深层垂直风切变强度普遍在12 m/s或以上,属于中等偏弱强度,显著弱于强对流风暴发展所需的垂直风切变强度阈值。中等偏弱的垂直风切变虽然不利于线状对流往倾斜形态发展,但可以减弱对流后方下沉气流的强度,由地面风观测显示冷池出流形成的偏北风维持2 m/s左右,可见削减因强降水形成的冷池出流强度。此外,中等偏弱的垂直风切

变促使上升气流所携带的水汽集中在对流层中下层,有利于提高降水效率,短时强降水发生几率增大,是南雨带降水对流性质更强的成因之一。在阳江沿海有利的弧形海湾地形背景下,04时风场出现明显的气旋性辐合特征(图7c),形成 $\gamma$ 中尺度涡旋,这在地面加强的垂直涡度场上有所提前体现(图7b,f)。随着对流快速升尺度增长并高度组织化为 $\beta$ 中尺度对流系统,演变为弓形回波,造成阳江阳东发生100 mm/h以上的强降水,导致短时间内累积雨量陡增,可见该地的降水突发性和极端性更强。研究表明,弓形回波的成因有两种,一是弓形回波的产生与后侧入流有密切关系<sup>[29-30]</sup>,二是飑线或线状对流与它前侧的孤立对流单体而产生<sup>[31-33]</sup>。结合回波演变特征可知,弓形回波前方并没有孤立对流单体活动,因此弓形回波的产生可能与后侧入流有关。需要指出的是,0~6 km风矢量



差为偏西北方向(图7b,f),与弓形回波的推移方向基本一致,配合500 hPa短波槽后的西北气流推动弓形回波快速从陆地移向海洋,对应阳江的降水强度逐渐减弱。

11日03–08时(图7),台山—中山长时间维持地面气旋式切变,由于强降雨的蒸发冷却和拖曳下沉作用,气旋式切变北侧出现24℃左右的闭合冷池中心(图7h),两侧形成1℃~2℃温差,冷池出流较弱,较小的温度梯度有利于地面东南暖湿气流沿冷池主动爬升,降水凝结潜热得以充分释放,产生密集的高效率降水,导致短时强降水站点增多,最大雨强超过50 mm/h。基于上述有利条件,沿气旋式切变持续有对流触发,对流在发展东移过程中的组织性逐渐增强,其推移方向与低层西南风和气旋式切变的走向一致,

回波最强达60 dBZ左右,强回波的持续影响导致中山三乡持续发生短时强降水。

综合上述分析,阳江和台山—中山的对流触发和维持机制是有差异的。阳江线状对流组织化与中等偏弱强度的深层垂直风切变有一定联系,而 $\gamma$ 中尺度涡旋可能是阳江阳东发生100 mm/h以上极端小时雨强的直接诱因,因此具备更强的降水对流性质。台山—中山长时间维持的地面气旋式切变既是对流触发的成因,同时也是对流的维持机制,弱冷池出流和温度梯度对持续密集降水和短时强降水的持续产生起到促进作用。关于 $\gamma$ 中尺度涡旋和冷池对强降水分布及强度的影响,受限于当前的垂直观测手段,仍然需要精细的多源观测资料,采取数值模拟方法进一步研究。

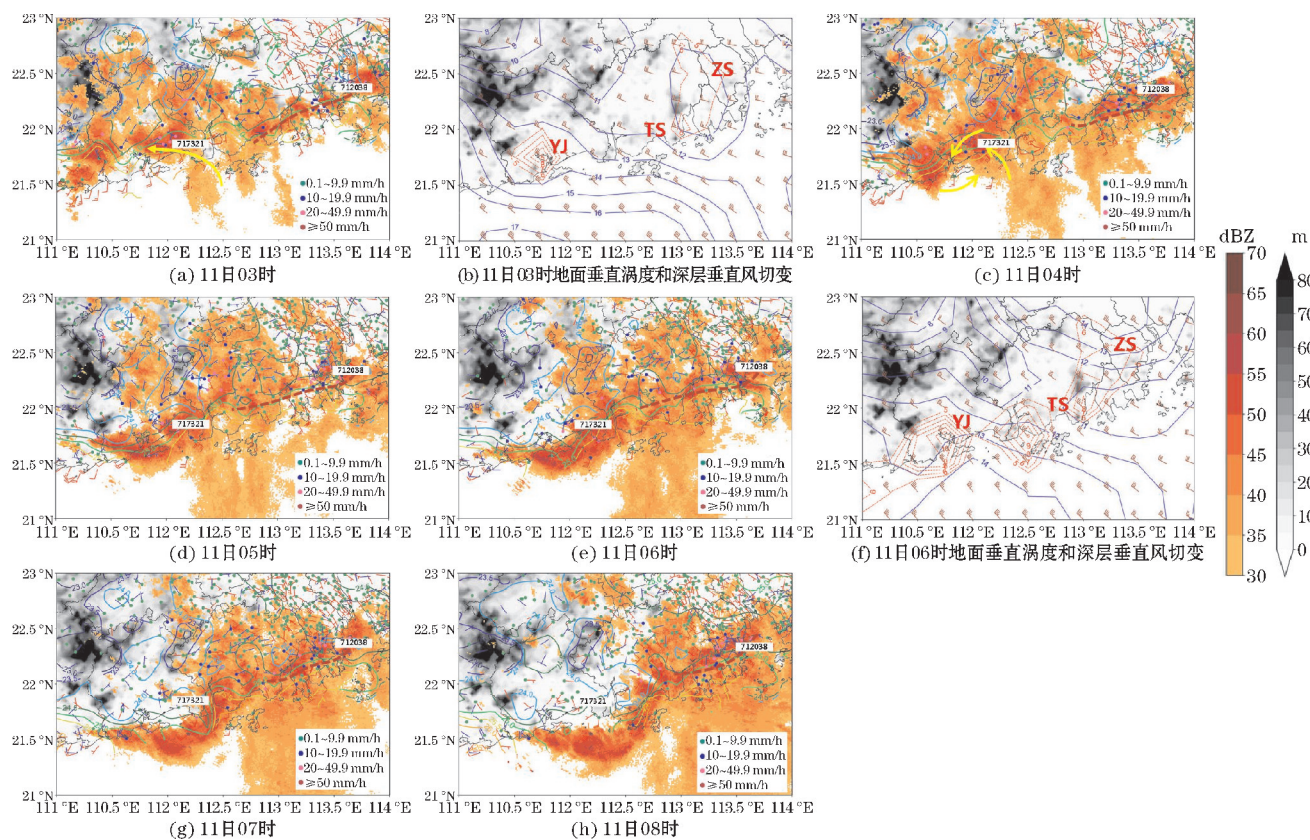


图7 11日03–08时地面风场、温度场、小时雨强和雷达组合反射率图

### 3.3 双雨带之间弱雨区产生的可能成因

由双雨带降水峰值发生时段的水汽通量及散度(图8)可见:11日07时(图8a、c、e),北雨带700 hPa水汽通量大值区为 $0.1 \sim 0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,南雨带为 $0.08 \sim 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,水汽通量大小相当;850 hPa大值区位于南雨带( $0.18 \sim 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),明显强于北雨带( $0.12 \sim 0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );925 hPa南雨带( $0.2 \sim 0.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )显著强于北雨带( $0.12 \sim 0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )。对比水汽通量散度,700 hPa和

925 hPa相当,850 hPa北雨带的水汽辐合强度( $< -10 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ )明显强于南雨带( $< -7 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ )。11日12时(图8b、d、f),700 hPa、850 hPa和925 hPa北雨带水汽通量均显著大于南雨带;水汽通量散度方面,700 hPa北雨带有更强的水汽辐合,强辐合区与强降雨有较好的对应关系,850 hPa和925 hPa水汽辐合强度均明显强于南雨带,华南沿海925 hPa辐合区对应南雨带落区。

综上,925 hPa水汽通量和辐合区都与南雨带落区有明显的正相关性,北雨带则是与700 hPa有较好的对



应关系。南雨带水汽输送主要集中在850 hPa以下,以925 hPa较为显著,北雨带则是来自更高层次700 hPa附近的水汽输送和辐合。值得指出的是,广州 700 ~ 925 hPa水汽通量大值区和辐散区并不完全对应,如

图 8(d),广州850 hPa水汽通量能达到 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,然而上游沿海地区存在次大值区 $0.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可能影响水汽输送,同时又处于水汽辐散区,不利于降水形成。

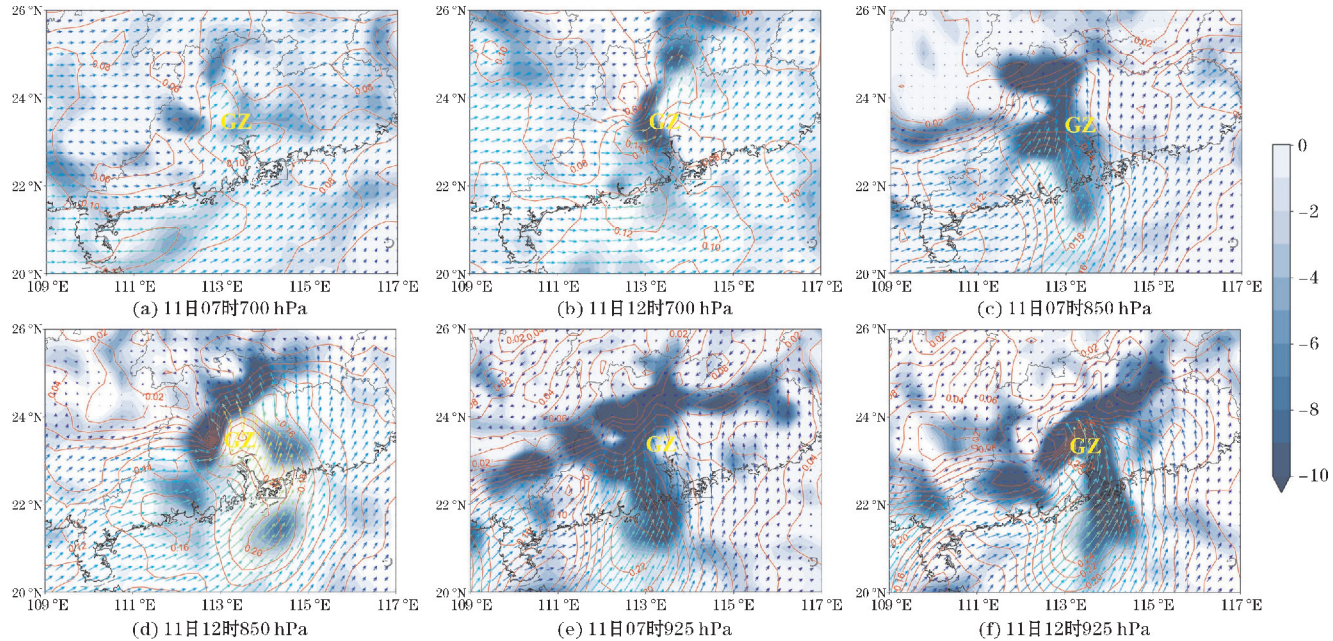


图 8 水汽通量及水汽通量散度

观察 11 日 10 ~ 12 时双雨带回波演变发现 (图 9a ~ c),广州上空无明显回波发展。强降水的形成除必须的水汽条件外,强烈的垂直上升运动也是重要因素,广州具备较为充足的水汽供应,因此可能缺乏动力机制作为初始对流的触发条件。沿广州 $113.5^\circ \text{E}$ 作经向环流垂直层次剖面 (图 9d ~ f),可见抬升机制

存在差异:北雨带垂直上升运动更强,动力抬升清晰,南雨带热力和水汽条件优越,然而广州为双雨带之间的弱雨区, $500 \sim 700 \text{ hPa}$ 为下沉气流,低层到高层为上升—下沉—上升结构,下沉气流抑制了对流的触发和上升运动,这可能是该地降水较弱的重要成因。

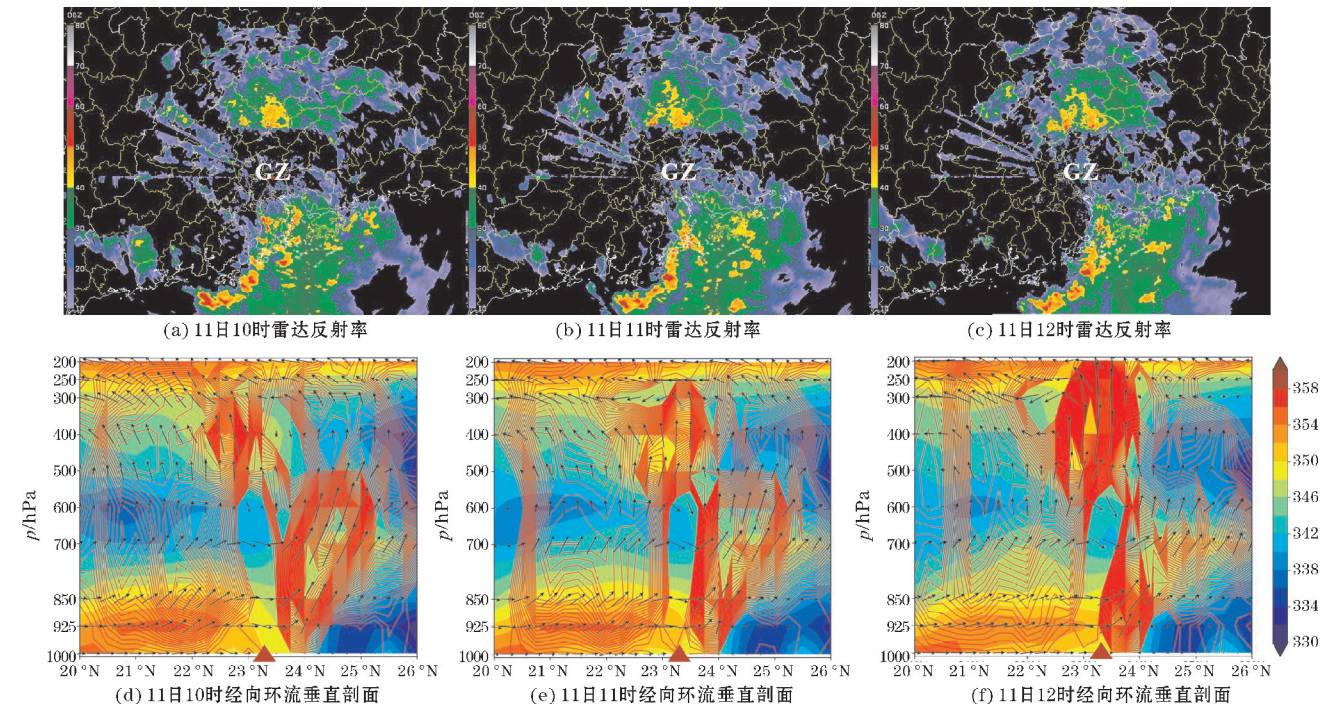


图 9 广州 $0.5^\circ$ 仰角双偏振雷达反射率和沿 $113.5^\circ \text{E}$ 经向环流垂直剖面



## 4 总结与讨论

本文选取2022年5月华南一次双雨带降水过程,采用湿位涡诊断方法,分析双雨带的降水特征与环境条件,并探讨其形成机制和弱雨区的可能成因,得到以下结论:

(1)此次双雨带产生在有利的大尺度环流背景、高湿和层结不稳定的中尺度对流环境。北雨带与925hPa切变线、低涡和锋面等系统相配合,具备一定的对流降水性质。南雨带在弱天气尺度强迫背景下产生,降水强度和对流性质更强,雨强具有极端性。

(2)湿位涡诊断表明,对流不稳定是北雨带降水发展的重要机制,MPV1和MPV2演变分别反映大气的对流稳定性和斜压性的强弱变化,北雨带MPV2长时间处于异常正大值区,显著的大气斜压性有利于低涡的发展,同时MPV2正值区增强可作为低空急流演变的示踪器。

(3)南雨带不同地区的对流触发与维持机制各有差异。阳江内陆由地面增强的东南暖湿气流、云雾山和天露山等地形抬升以及冷池的相互作用产生降水;地表非均匀加热,鹅凰嶂、龙高山和紫罗山等地形的正面阻挡及其造成的地面东南暖湿气流发生气旋式侧向摩擦,促使地面垂直涡度发展,因而阳江沿海的初始对流得到触发,中等偏弱的深层垂直风切变环境和 $\gamma$ 中尺度涡旋对该地的对流组织化及降水效率有一定程度的影响。台山—中山对流的触发和维持机制均为地面气旋式切变,中尺度对流系统沿着气旋式切变发展,强降水形成的弱冷池出流和温度梯度对降水强度起促进作用。

(4)北雨带水汽输送主要位于700 hPa附近,南雨带则主要来自850~925 hPa。广州位于水汽输送和南雨带落区的下游,同时850 hPa为水汽辐散区,500~700 hPa为下沉气流,低层到高层是上升—下沉—上升结构,处于弱雨区或与此有关。

本文着重分析双雨带的降水特征、环境条件及形成机制,对其热动力特征有一定了解。然而,本文结论仅限于此次双雨带个例,是否具有普适性还有待日后结合更多类似的典型个例,通过数值模拟等方法开展深入的对比和研究。

## 参考文献:

- [1] 林确略,赵华生,林宝亭. 双雨带过程中的回流暖区暴雨个例对比研究[J]. 热带气象学报, 2020,36(6):721-733.
- [2] 陈涛,陈博宇,于超,等. 华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J]. 气象, 2020,46(9):1129-1142.
- [3] 覃武,刘国忠,赖珍权,等. 华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨[J]. 气象, 2020,46(8):1039-1052.
- [4] Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al. The southern China Monsoon Rainfall Experiment (SCMREX) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(5):999-1013.
- [5] Wu M W, Luo Y L. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015 [J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(5):719-736.
- [6] 吴乃庚,温之平,邓文剑,等. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J]. 气象科学, 2020,40(5):605-616.
- [7] 湛芸,陈涛,汪玲瑶,等. 中国暖区暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019,38(5):483-493.
- [8] Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N. A Diagnostic and Numerical Study on a Rainstorm in South China Induced by a Northward Propagating Tropical System [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 22(3):284-302.
- [9] 张立凤,查石祥,张铭. 一次华南暴雨过程的数值模拟和试验[J]. 气象科学, 2000,20(2):120-128.
- [10] 王鹏云,肖乾广,林永辉,等. 卫星遥感地表植被及其在华南暴雨中尺度数值模拟中的应用试验[J]. 应用气象学报, 2001,12(3):285-296.
- [11] 蒲义良,卢栩诗,胡胜,等. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. 气象, 2023,49(2):201-212.
- [12] Wang H, Luo Y L, Jou B J D. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: Observational analysis [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 2014, 119(23):13206-13232.
- [13] Liu X, Luo Y L, Guan Z, et al. An Extreme Rainfall Event in Coastal South China During SCMREX-2014: Formation and Roles of Rainband and Echo Trainings [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(17).
- [14] 罗娟,冯家兄,陈沐希. 中尺度对流系统内 $\beta$ 尺度双雨带不稳定机制及锋生对比分析[J]. 干旱气象, 2018,36(3):456-464.
- [15] 赵玉春,李泽椿,肖子牛. 华南锋面与暖区暴雨两个例对比分析[J]. 气象科技, 2008,36(1):47-54.
- [16] 张晓惠,倪允琪. 华南前汛期锋面对流系统与暖区对流系统的个例分析与对比研究[J]. 气象学报, 2009,67(1):108-121.
- [17] 林晓霞,冯业荣,张诚忠,等. 华南一次暴雨过程热力和动力特征的诊断分析[J]. 热带气象学报, 2017,33(6):975-984.
- [18] 李英,陈联寿,雷小途. Winnie (1997) 和 Bilis (2000) 变性过程的湿位涡分析[J]. 热带气象学报, 2005,21(2):142-152.
- [19] 赖绍钧,何芬,赵汝汀,等. “龙王”(Longwang)台风过程湿位涡的诊断分析[J]. 气象科学,



- 2007,27(3):266–271.
- [20] 丁治英,王爽,高松.一次华南双雨带暴雨中的位涡演变与雨带间的相互作用[J].大气科学学报,2017,40(5):653–662.
- [21] 贺哲,竹磊磊,张霞,等.河南省秋季连续两个暴雨日的锋生和不稳定诊断分析[J].气象,2022,48(9):1101–1115.
- [22] 张入财,田金华,陈超辉,等.郑州“7·20”特大暴雨极端性成因分析[J].气象与环境科学,2022,45(2):52–64.
- [23] 刘学华,朱宵峰,梁亮.Q矢量和湿位涡在梅雨期区域性暴雨中的诊断分析[J].气象与环境学报,2013,29(4):11–17.
- [24] 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.
- [25] Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall [J]. Rev. Geophys., 2014,52(3):522–555.
- [26] 陈元昭,俞小鼎,陈训来.珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J].气象,2016,42(2):144–155.
- [27] Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. Monthly Weather Reviews, 1982,110(6):504–520.
- [28] Weisman M L, Klemp J B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears [J]. Monthly Weather Reviews, 1984,112(112):2479–2498.
- [29] Weisman M L. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived meso-convective systems [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1992,49(19):1826–1847.
- [30] Grim J A, Rauber R M, Mcfarquhar G M, et al. Development and forcing of the rear inflow jet in a rapidly developing and decaying squall line during BAMEX [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(4):1206–1229.
- [31] Wolf P L. WSR-88D radar depiction of supercell-bow echo interaction: Unexpected evolution of a large, tornadic, “comma-shaped” supercell over eastern Oklahoma [J]. Weather and Forecasting, 1998,13(2):492–504.
- [32] Lapenta K D, Bosart L F, Galarneau T J, et al. A multiscale examination of the 31 May 1998 Mechanicville, New York, Tornado [J]. Weather and Forecasting, 2005,20(4):494–516.
- [33] French A J, Parker M D. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms [J]. Weather and Forecasting, 2012,27(2):255–278.

## Analysis of a Double Rain Belts Precipitation Process in the Pre-flood Season of South China

GUO Zhaohua<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>2,1,3</sup>, XIAO Tianguai<sup>1</sup>, ZENG Zhilin<sup>4</sup>, CAI Jingjiu<sup>4</sup>, YU Chengyuan<sup>5</sup>

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 4. Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510640, China; 5. Stony Brook Institute at Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** In order to deepen the scientific understanding of the formation mechanism of double rain belts in the pre-flood season of South China, this paper uses the hourly observation data of national and regional automatic stations, sounding data of Yangjiang and Qingyuan, doppler weather radar network products, Guangzhou dual-polarization weather radar data and ERA5 reanalysis data, by method of moisture potential vorticity diagnosis to analyze the environmental conditions and formation mechanism of a double rain belts event in South China in May 2022. The results are as follows. (1) Double rain belts occurred in a mesoscale convective environment with high humidity and unstable stratification. However, the northern rain belt was a large-scale frontal rain belt formed by the synergistic forcing of low vortex, shear line, front and other weather systems. The precipitation area was concentrated and had certain convective properties. The southern rain belt was generated under the background of weak weather scale forcing. The sudden and nocturnal precipitation was obvious, and the convection was stronger and extreme. (2) Convective instability was the important mechanism for development of the northern rain belt. The area of low-level MPV1<0 and MPV2>0 corresponded to the heavy rainfall area in the northern rain belt. Strong atmospheric baroclinicity was conducive to the development of low-level vortex. (3) The warm and humid southeasterly air strengthened at night in the southern rain belt, and the blocking and uplifting of the land-sea boundary and coastal topography promoted the lateral friction of airflow, triggering the initial convection in Yangjiang. Moderately weak deep vertical wind shear and  $\gamma$  mesoscale vortex contributed to the maintenance of convective organization. The initial convection triggered under the action of surface cyclonic shear and topographic uplift between Taishan and Zhongshan, which was conducive to the maintenance of convective system and precipitation with weak cold pool outflow and temperature gradient. (4) The water vapor transport associated with the northern rain belt came from the vicinity of 700 hPa, and the water vapor transport in the southern rain belt came from 850–925 hPa. The weak precipitation area between the double rain belts may be related to the location of the low-level southwest jet, the middle-level downdraft and the low-level divergence.

**Keywords:** double rain belts in South China; front; cyclonic shear; moisture potential vorticity; convection triggering