

覃皓, 范娇, 农孟松, 等, 2024. 广西初春双对流强降水带过程诊断分析[J]. 气象, 50(8):917-928. Qin H, Fan J, Nong M S, et al, 2024. Diagnostic analysis of a process of double-convective heavy precipitation bands in Guangxi in early spring[J]. Meteor Mon, 50(8):917-928(in Chinese).

广西初春双对流强降水带过程诊断分析*

覃 皓¹ 范 娇^{1,2} 农孟松¹ 赖珍权¹ 翟舒楠¹ 刘 乐¹
刘晓梅¹ 庞 芳¹ 周亦靖¹ 邱 滋¹

1 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022

2 南宁市气象局, 南宁 530029

提 要: 2023 年 3 月 25 日 20:00 至 26 日 08:00, 广西出现一次双对流强降水带过程, 与以往双雨带存在显著差异, 主、客观预报均出现明显偏差。利用多源实况以及 ERA5 再分析资料, 对此次过程进行了 Rossby 波能量频散、湿位涡及水平锋生强迫等诊断分析。结果表明: 该过程发生于大尺度环流调整背景下, 中高纬地区源自极涡以及黑海的两支 Rossby 波列共同促进了东北地区的横槽在东移过程中逐渐转竖, 引导冷空气补充南下。低纬地区南支槽在此期间逐渐东移, 为广西地区冷垫之上的气层抬升提供动力条件, 同时也促进低层冷暖空气在广西交汇。随着冷空气补充南下、惯性振荡促使偏南风向北推进, 冷暖空气在广西一带交汇增强, 大气湿斜压性增强使得湿位涡发展, 导致出现条件对称不稳定层结。暖湿空气自南向北倾斜爬升至 700 hPa 附近条件对称不稳定区后与高空槽前正涡度平流相配合触发高架对流, 使得北支对流带发展。冷空气深入南下后受广西特殊地形影响, 等 θ_{se} 线与流场的有利配置形成拉伸变形效应导致锋生强迫, 使得越南东北部南支初始对流触发。北部湾中部低层较大 θ_{se} 纬向梯度以及强垂直风切变造成较强湿斜压性, 促进南支对流系统途经时组织化发展, 并由于中层干空气夹卷形成弓形回波。预报中需重点关注数值模式对中层低槽的预报以及冷垫上的热力条件, 以捕捉北支锋后高架对流发生发展的关键信息。

关键词: 双对流带/双雨带, 高架对流, 条件对称不稳定, 惯性振荡, 锋生强迫

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.030801

Diagnostic Analysis of a Process of Double-Convective Heavy Precipitation Bands in Guangxi in Early Spring

QIN Hao¹ FAN Jiao^{1,2} NONG Mengsong¹ LAI Zhenquan¹ ZHAI Shunan¹
LIU Le¹ LIU Xiaomei¹ PANG Fang¹ ZHOU Yijing¹ QIU Zi¹

1 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

2 Nanning Meteorological Bureau, Nanning 530029

Abstract: Guangxi encountered a process of double-convective-bands from 20:00 BT 25 to 08:00 BT 26 March 2023. This process was significantly different from that of the double rain belts in the past, causing significant deviations in the subjective and objective forecasts. Based on multi-source observation data and ERA5 reanalysis data, the Rossby wave energy dispersion, moist potential vorticity and horizontal fronto-genic forcing in this process are analyzed. The results show that this process occurred under the background of large-scale circulation adjustment. The two Rossby wave trains that originated from the polar

* 广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026349、2022GXNSFBA035565)、广西重点研发计划项目(桂科 AB22080101)和广西气象科研项目(桂气科 2024M02)共同资助

2024 年 1 月 25 日收稿; 2024 年 4 月 19 日收修定稿

第一作者: 覃皓, 主要从事天气、气候机理诊断分析. E-mail: 289055112@qq.com

通讯作者: 农孟松, 主要从事灾害性天气预报和研究. E-mail: nmsong1997@163.com

vortex and the Black Sea in the mid- and high-latitude jointly promoted the gradual vertical rotation of the transversal trough in the northeast region, guiding the mid- and high-latitude cold air further southward. During this period, the south branch trough in the low latitude gradually moved eastward, providing the dynamic lifting above the cold cushion in Guangxi, and also promoting the convergence of cold and warm airs in the low troposphere in Guangxi. With the addition of cold air to south and the southerly winds advancing northward under the inertial oscillation, the convergence of warm and cold airs in Guangxi was enhanced. The enhancement of atmospheric moist baroclinicity led to the development of moist potential vorticity, resulting in conditional symmetric instability of stratification. The warm-moist air climbed from south to north reaching the conditional symmetric instability area near 700 hPa, and then combined with the positive vorticity advection in front of the upper-level trough to trigger elevated convection, resulting in the development of the north-branch convective band. Influenced by the special topography of Guangxi, the favorable configuration of the θ_{se} isoline and the flow formed a tensile deformation effect, leading to frontogenic forcing, which triggered the initial convection in the south branch of Northeast Vietnam. The large θ_{se} latitudinal gradient and strong vertical wind shear in the low level of the central Beibu Gulf resulted in strong moist baroclinicity, which promoted the organization and development of the south-branch convective system when it passed through, and formed bow echo due to the mid-level dry air entrainment. In order to capture the key information of the occurrence and development of elevated convection after the north-branch front, it is necessary to focus on the numerical model in forecasting the mid-level trough and the thermo dynamic conditions above the cold air cushion.

Key words: double-convective-bands/double rain belts, elevated convection, conditional symmetric instability, inertial oscillation, frontogenic forcing

引 言

冬末春初是每年广西强对流季的启始时段,由于低纬度地区大气不稳定能量逐渐复苏,多种类型强对流天气轮番上演(农孟松等,2013;2014;吴乃庚等,2013)。随着对流系统的发展、移动,常会在华南地区南北两侧形成双雨带(林宝亭等,2020;林确略等,2020;覃皓等,2023c)。

目前对双雨带已有一定认识,其中北支雨带主要与锋面系统有关,并与副热带西风急流右后方的质量调整存在密切联系(丁治英等,2009),层结上以对流对称不稳定为主(张晓惠和倪允琪,2009)。南支雨带则为暖区对流,大气层结存在显著的湿对流不稳定,主要由低空急流、地面辐合线以及地形抬升等触发对流(罗建英等,2009;蒲义良等,2023;覃皓等,2023b)。林宝亭等(2020)和林确略等(2015;2020)则进一步指出南支雨带还存在另一类暖区对流,即回流暖区型,并强调了其与传统暖区、典型锋面对流在形成机制上的差异。此外,也有研究对双雨带在形成与维持过程中的相互作用进行了讨论,

发现其机制主要与中层位涡、边界层水汽输送以及地面冷池出流有关(丁治英等,2017;王华等,2019)。在预报方面,中尺度区域模式能较好反映北支锋面对流的基本特征,且对于锋前低压槽、低空急流等天气系统强迫具有较高的预报敏感性。相较而言,主流业务模式对于暖区对流的预报能力有限,尤其体现在对流系统的强度、组织性等方面(陈涛等,2020;覃武等,2020)。可见,南北两支雨带在动力条件、层结特征以及可预报性方面均存在明显差异,但大多数双雨带过程中南北雨带均分别与暖区和锋面性质对流相对应。

2023年3月22日08:00至26日08:00,受高空槽和冷空气补充南下影响,广西出现当年首场大范围强对流天气过程。其中,25日20:00至26日08:00,强对流落区分别位于广西南部沿海及中北部,呈东西向带状分布。由于前期22—24日广西大部已经历过多轮强对流天气影响,该阶段冷空气前沿已位于广西沿海一带,对对流潜势的低估导致主观预报出现明显漏报。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)细网格全球模式以及CMA-GD和CMA-MESO中尺度模式均存在不同程度的空报、

漏报,本地对流尺度模式的对流触发区和对流形态演变也与实况存在明显差异。受南北对流系统的影响,降雨落区呈大致平行的双雨带特征,但与以往双雨带性质存在明显差异:南北对流系统及降雨落区分别位于低层锋区以及锋后,而并非传统认知的锋前暖区和锋面附近,这也是造成主观预报偏差的重要原因。本研究利用多源观测及再分析资料,首先对大尺度环流背景场的演变及成因进行诊断分析,而后具体讨论造成双对流带/双雨带的热力和动力机制,最后总结该类过程的有利天气形势以及层结特征,以期丰富华南双对流带/双雨带机理模型,为预报分析提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

观测分析采用广西常规气象观测国家站、区域站资料以及广西 11 部 CINRAD-SA 多普勒雷达的组合反射率资料;环流形势分析采用美国环境预报中心和国家大气环境研究中心(NCEP/NCAR)的逐月和逐日再分析资料(分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$);逐小时分析采用 ECMWF 的 ERA5 再分析资料(分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)。再分析资料包括位势高度、温度、比湿和水平风场等变量。气候背景流场取 1991—2020 年 3 月的 30 年平均值。

1.2 方法

1.2.1 Rossby 波能量频散诊断

欧亚大陆上游的异常形势常通过 Rossby 波能量频散影响下游地区,调控东亚环流形势,促使冷空气南下。通过 T-N 波作用通量(Takaya and Nakamura, 2001)对 Rossby 波能量传播进行诊断,其水平分量表达式如下:

$$\mathbf{W} = \frac{p}{2|\mathbf{U}|} \begin{bmatrix} \bar{u}(\psi_x'^2 - \psi'\psi_{xx}') + \bar{v}(\psi_x'\psi_y' - \psi'\psi_{xy}') \\ \bar{u}(\psi_x'\psi_y' - \psi'\psi_{xy}') + \bar{v}(\psi_y'^2 - \psi'\psi_{yy}') \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: p 为气压(单位:Pa); ψ 为准地转流函数(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);“'”表示相对于气候态的扰动;下角 x, y 分别表示在 x 或 y 方向求偏导; $\mathbf{U} = (\bar{u}, \bar{v})$ 为气候背景流场。波作用通量的矢量大小表征波能量的频散强度,矢量方向与 Rossby 波能量的传播方向一致。波作用通量的散度为正(负),表征扰动减弱(增强)。

1.2.2 湿位涡分析

为了解大气正压、斜压的作用,利用湿位涡(MPV)进行分析:

$$\text{MPV} = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), ζ 为垂直涡度(单位: s^{-1}), f 为科氏参数(单位: s^{-1}), θ_{se} 为假相当位温(单位:K)。方程右侧第一项为湿正压项,体现了惯性稳定度和对流稳定度的共同作用,记为 MPV1;第二项为湿斜压项,表示湿斜压性和垂直风切变的共同作用,记为 MPV2。

1.2.3 水平锋生强迫诊断

为分析冷暖空气交汇过程中水平锋生强迫对对流触发的作用,计算以 θ_{se} 为参数(考虑水汽)的水平锋生函数 F (Yang et al, 2014):

$$F = F_1 + F_2 \quad (3)$$

$$F_1 = -\frac{1}{2|\nabla \theta_{\text{se}}|} \times \left[\left(\frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial y} \right)^2 \right] \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$F_2 = -\frac{1}{|\nabla \theta_{\text{se}}|} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial y} \right)^2 \right] \times \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial x} \frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (5)$$

式中: F_1 为散度项, F_2 为变形项,分别反映了锋区中的水平风场辐合辐散及水平伸缩、切变变形场对锋生作用的贡献。 $F > 0$ 时为锋生, F 越大,锋区强度越强; $F < 0$ 时则为锋消。

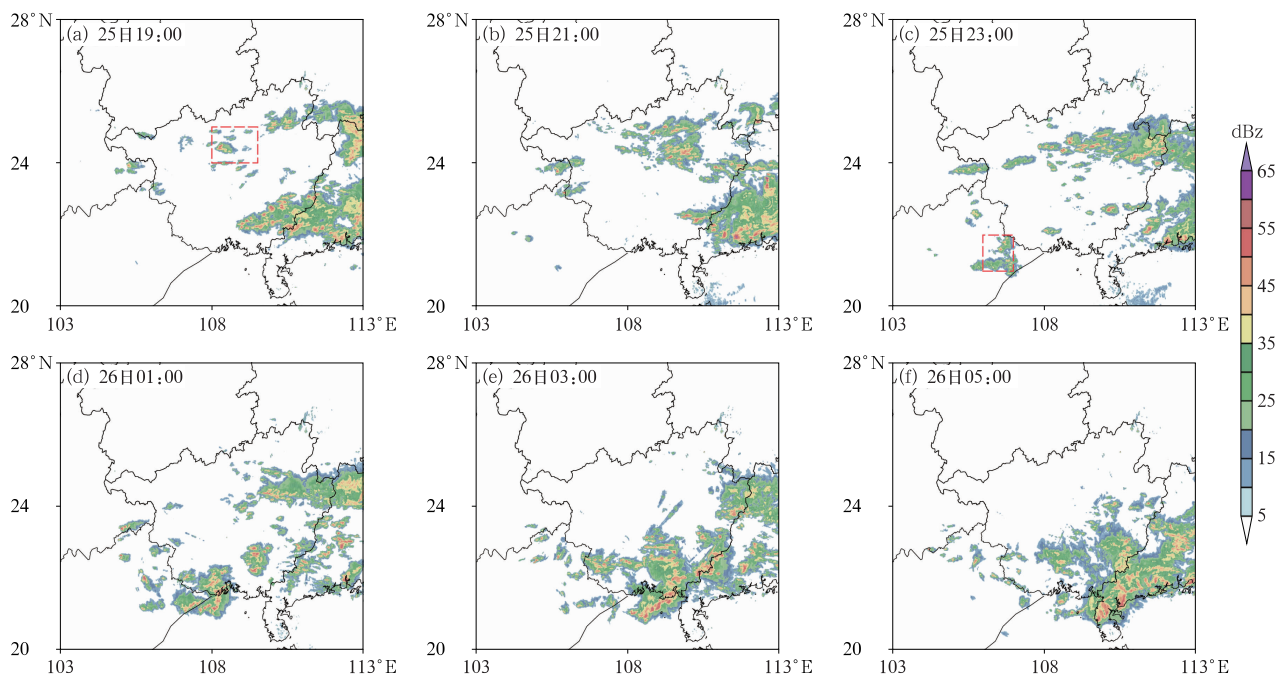
2 过程概况

2023 年 3 月 25 日 17:00(北京时,下同),广西境内强对流回波主要集中于南部及北部地区东侧,均呈逐渐东移减弱态势。18:00—19:00(图 1a),在北中部的河池市一带有新的对流单体触发,随后逐渐东移,即北支对流带。20:00—23:00 北中部对流系统不断触发,在东移过程中不断有零散回波新生并入,逐渐连接形成东西向带状强回波,层状云回波中镶嵌多个强单体,最大组合反射率因子达到 60 dBZ(图 1b, 1c),造成 $25.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的最大小时雨强。直至 26 日 00:00 以后,北支对流带逐渐减弱(图 1d),并于 03:00—04:00 移出广西(图 1e)。由

于回波带形态与移动方向基本平行,形成“列车效应”,使得广西东北部的桂林、梧州、贺州交界一带成为北支强对流带暴雨中心(图2),25日20:00至26日08:00累计降水量最大达63 mm。

南支对流带起始相对较晚,25日22:00—23:00,在越南东北部一带有对流触发,并逐渐东移影响广西南部沿海地区(图1c)。随后回波带向南、向北伸展,26日01:00左右移动到北部湾西侧,呈南北走向(图1d)。在后续东移过程中回波带逐渐

发展增强,并在经过北部湾中部时组织化发展,形成弓形回波,大面积组合反射率因子超过40 dBZ(图1e),造成北部湾沿海一带出现雷暴大风,极大风速达 $19.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相较而言,南支对流带降水强度强于北支,最大小时雨强和最大累计降水量均出现在广西东南部(图2),分别为 $46.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和80.4 mm。05:00,弓形回波移至广西、广东交界时逐渐减弱,组织性转差,大于40 dBZ的强回波带逐渐零散碎片化(图1f),过程趋于结束。



注:红方框为对流初生位置。

图1 2023年3月25—26日雷达组合反射率因子分布

Fig. 1 Distribution of radar composite reflectivity from 25 to 26 March 2023

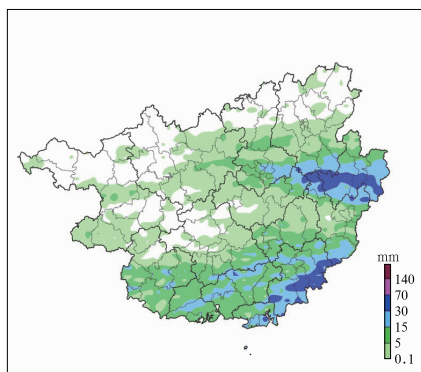


图2 2023年3月25日20:00至
26日08:00累计降水量

Fig. 2 Accumulated precipitation from
20:00 BT 25 to 08:00 BT 26 March 2023

3 成因分析

3.1 大尺度环流调整促使冷空气补充南下

在广西春季强对流事件中,冷空气活动至关重要,其一方面为对流系统提供抬升触发条件,另一方面可与暖空气相互作用形成锋生效应,通过大气低层湿位涡发展提供利于对流发展的层结条件(邓承之等,2019;毛程燕等,2021;覃皓等,2023c)。由于冷空气活动与中高纬大尺度环流演变密切相关,因此以下从能量视角讨论过程期间环流调整的原因及其对冷空气活动的影响。

中高纬度横槽转竖是冷空气预报的关键着眼点。3月24日,500 hPa上高纬地区极涡东移南下至(75°N、80°E)附近,其中心存在波作用通量辐散,Rossby波能量向下游贝加尔湖高压脊(以下简称贝湖脊)区方向频散,沿波作用通量方向存在由极涡、贝湖脊和位于东北地区的横槽(以下简称东北横槽)3个位势高度中心构成的 Rossby 波列(图 3a)。贝湖脊区呈西南—东北向,波能量在脊内分别向东、向南频散,在东亚大槽、东北横槽内辐合,预示脊将减弱而槽将进一步发展。此时前期南下的冷空气位于江南至华南北部,而东北横槽内部已重新聚集大量冷空气,850 hPa 温度负距平中心达到 -5.5°C (图 3d)。低纬地区南支槽位于 100°E 附近,引导孟加拉湾及南海暖湿气流与前期南下的冷空气在华南北部交汇。25—26 日,极涡东移后稳定在 100°E 附近,来自其内部的波作用通量不断下传并在脊(贝湖脊)前、槽(东北横槽)后辐合,同时横槽区内波作用通量持续向下游日本海一带频散,且强度逐渐增强,导致槽脊东移过程中扰动能量逐渐减弱,从而使横槽转竖(图 3b, 3c)。受上述环流调整影响,原横槽内冷空气大举南下,与前期冷空气汇合后补充南下至华南沿海,850 hPa 上 288 K 温度线由华南北部南压至海岸线一带(图 3e, 3f)。低纬地区南支槽在此期间东移并减弱,为广西地区冷垫之上的气层抬升提供了一定动力条件,同时也促进了低层冷暖空

气在广西沿海交汇。

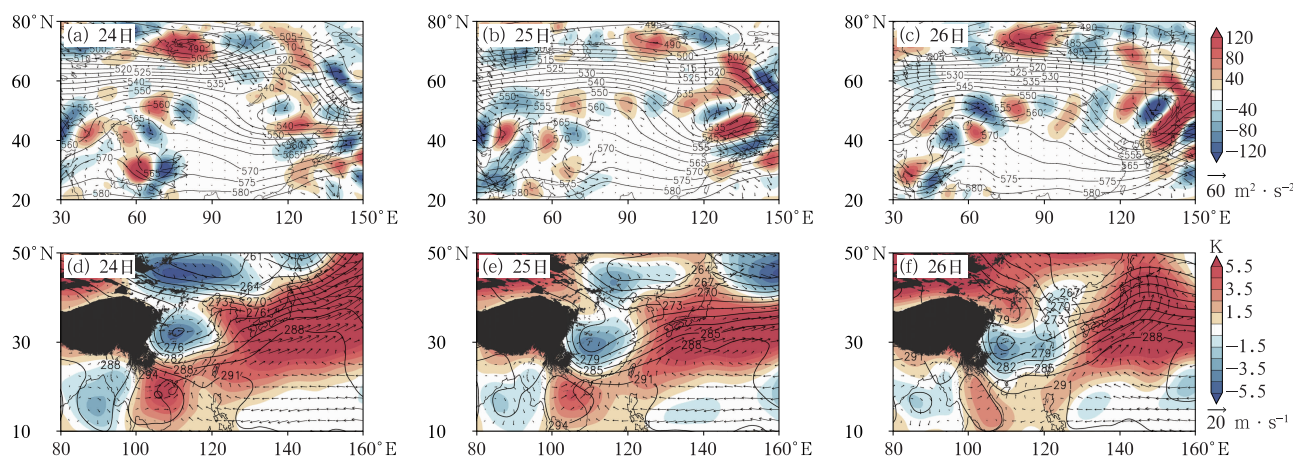
除来自高纬度和低纬度的信号外,3月24—25日在中纬度 50°N 附近有 Rossby 波能量自西向东传播,波作用通量辐合辐散区逐渐向东北横槽发展,沿其路径上的位势高度线存在明显波动特征。从 500 hPa 经向风的距平分布上可以更清楚地看到这支中纬度 Rossby 波列,其源地位于黑海槽区附近,经向风距平在欧亚中纬度大陆上呈“正-负-正-负-正”分布(图略),形态特征与丝绸之路遥相关(Hong et al, 2018; Li et al, 2023)或环球遥相关(Sun et al, 2018; He et al, 2021)的欧亚大陆部分相似。 60°N 附近密集的等位势高度形成强劲急流,可作为大气 Rossby 波导,将 Rossby 能量向下游频散(Hoskins and Ambrizzi, 1993),因而中纬度 Rossby 波列在急流波导作用下逐渐东传,最终与来自高纬度的波能量汇合于横槽附近,共同促进了横槽转竖。

3.2 条件对称不稳定配合涡度平流促进北支对流带发展

基于上述冷空气补充南下的大尺度环流背景,以下具体讨论北支对流带发生发展的热力和动力机制。

3.2.1 冷暖空气交汇推动层结条件对称不稳定发展

沿北支对流带触发位置作经向垂直剖面,分析环境层结条件演变特征。对流发生前,广西上空低



注:图 d~f 中阴影表示地形。

图 3 2023 年 3 月 24—26 日逐日(a~c)500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)、波作用通量(箭头)及其散度(填色,单位: $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), (d~f)850 hPa 温度(等值线,单位:K)及其距平(填色)、风场(箭头)

Fig. 3 Daily (a~c) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), wave-activity flux (arrow) and its divergence (colored, unit: $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), (d~f) 850 hPa temperature (contour, unit: K) and its anomaly (colored), wind field (arrow) from 24 to 26 March 2023

层大气为对流稳定层结(图 4a, $\partial\theta_{se}/\partial p < 0$), 冷空气已南下至 22°N 附近。来自洋面的偏南风与大陆上的偏北风在广西上空交汇, 南北风速此时较小, 分别对应较弱的暖、冷平流(图 4d)。由于暖空气在冷垫上爬升, 大气斜压性较强, 对应 MPV 负值区自南向北逐渐升高, 其下边界与对流稳定度零线几乎重合(图 4a)。之后随着冷空气补充南下, 偏北风风速由 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 偏南风也有所增强并向北推进, 使得暖空气在冷垫上斜升, 形成低层冷平流之上的倾斜暖平流, 且平流强度均有所增强(图 4e)。上述变化造成广西上空低层对流稳定层

结随冷空气厚度增大而逐渐增高, 与 MPV 负值区在 $24^\circ\sim 26^\circ\text{N}$ 的 700 hPa 附近重叠(图 4b), 该纬度范围正是北支对流带触发位置。根据层结不稳定判据, 该区域内绝对涡度($\zeta + f$) > 0 , 大气层结为惯性稳定(图略), 同时对流稳定且 $\text{MPV} < 0$, 因此可判定该区域存在条件对称不稳定。暖湿空气自南向北倾斜爬升至 700 hPa 附近条件对称不稳定区后, 触发高架对流, 释放不稳定能量。对流发生后, 冷暖空气势力均逐渐减弱(图 4f), MPV 负值区下边界与对流稳定度零线再次重合(图 4c), 大气对称不稳定消耗殆尽, 对流结束。

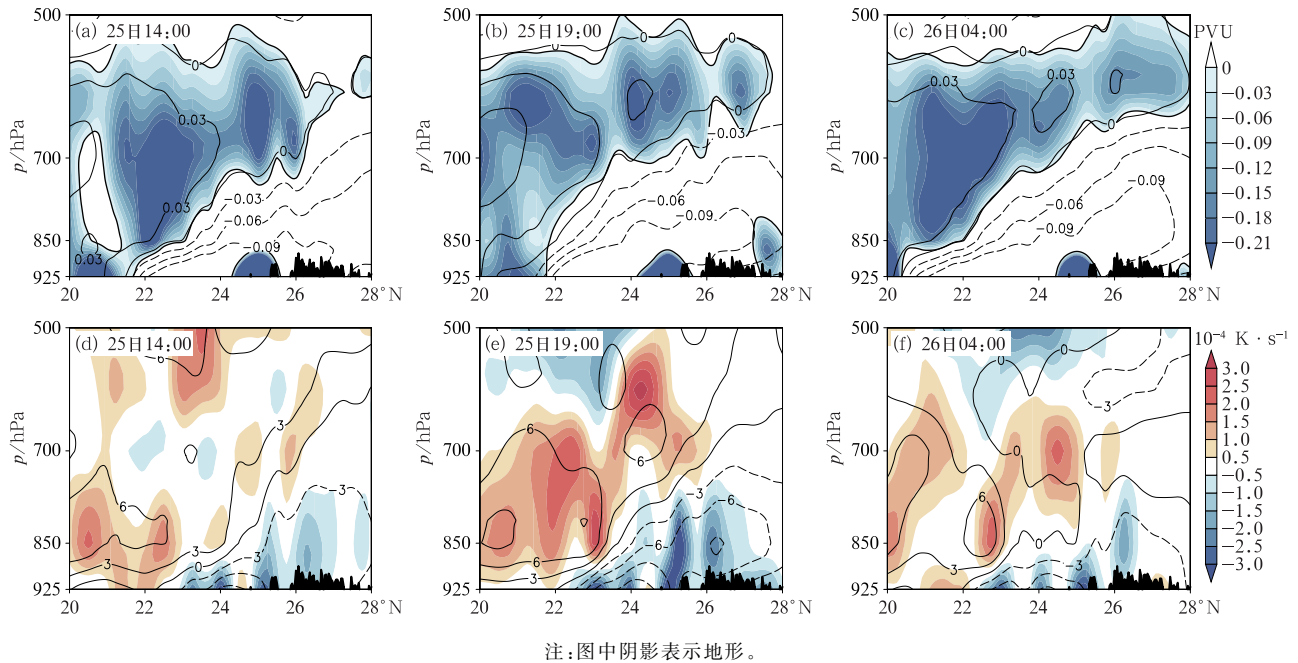


图 4 2023 年 3 月 25—26 日沿 109°E 的(a~c)MPV(填色)与对流稳定度(等值线, 单位: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$), (d~f)温度平流(填色)与经向风速(等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的垂直剖面

Fig. 4 Cross-section of (a~c) MPV (colored) and convective stability (contour, unit: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$), (d~f) temperature advection (colored) and meridional wind speed (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 109°E from 25 to 26 March 2023

进一步具体分析对流发生阶段 MPV 各项对于条件对称不稳定发展的贡献。由 700 hPa 对流触发区域(图 1a 中红方框, 下同)平均的 MPV 以及对流稳定度的时间演变可见(图 5), MPV1 在整个过程中均为正值, 其演变较为平缓, 同时层结始终为对流稳定。MPV2 在整个过程中均为负值, 并在 25 日 17:00—21:00 明显增强, 极值位于 19:00, 其演变趋势主要受 $-g(\partial u/\partial p)(\partial\theta_{se}/\partial y)$ 项主导, 对应了该阶段冷暖空气交汇增强(图 4b, 4e)导致 θ_{se} 经向梯度增大, $-g(\partial\theta_{se}/\partial y)$ 增大, 同时 $\partial u/\partial p < 0$ (纬向风速随高度增大, 但随时间变化不明显)。上述变化使得

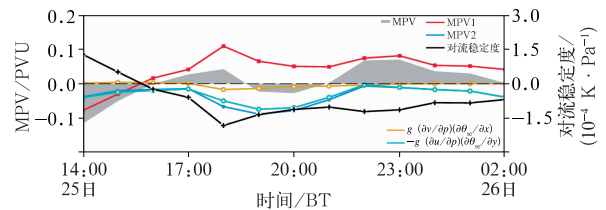


图 5 2023 年 3 月 25 日 14:00 至 26 日 02:00 区域 ($24^\circ\sim 25^\circ\text{N}$, $108^\circ\sim 109.5^\circ\text{E}$) 平均的 700 hPa MPV 及其各项和对流稳定度的时间演变

Fig. 5 Time variation of 700 hPa MPV and its contribution terms as well as convective stability averaged in the region ($24^\circ\sim 25^\circ\text{N}$, $108^\circ\sim 109.5^\circ\text{E}$) from 14:00 BT 25 to 02:00 BT 26 March 2023

MPV2 在该阶段逐渐达到负极值,促使 MPV 由正转负,表明主要是大气湿斜压性的增强使得 MPV 发展,最终导致层结出现条件对称不稳定。

前文分析表明,冷空气补充南下主要受中纬度环流调整影响,以下讨论暖湿偏南风增强并向北推进的可能原因。已有研究表明,惯性振荡是导致风场日变化的重要机制之一(Blackadar, 1957; Zhang et al, 2019; Luo et al, 2023),广西地区偏南风增强往往与惯性振荡导致的非地转风旋转有关(智协飞等, 2022; 覃皓等, 2023a)。图 6 为 25 日 07:00—19:00 的 850 hPa 非地转风场及日平均风场,可以看到广西南部地区的非地转风场存在随时间顺转特征:从 07:00 的偏西风逐渐转为 19:00 的偏南风。由于日平均风场为偏南风,19:00 左右偏南非地转风场与之叠加,进而促进偏南风增强,推动了暖空气在冷垫上爬升。

3.2.2 中高层涡度平流提供动力抬升作用

中高层系统能提供有利于高架对流发生发展的动力条件,高空槽则是广西地区初春季节触发高架对流的常见天气系统(农孟松等, 2013; 吴乃庚等, 2013)。此次过程期间南支槽逐渐东移影响广西。在高架对流触发时刻,即 25 日 19:00 区域平均的垂直廓线可见(图 7),700 hPa 之上为槽前区,经向风速大于零,此时 800~400 hPa 存在正涡度平流,强中心位于 500 hPa 附近,达到 $3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ 。由准地转 ω 方程可知,中层高空槽前涡度平流随高度增大时,低层有上升运动发展,可见此时 800 hPa 之上均为上升运动,有利于冷垫之上对流的触发,促进不稳定能量释放(25 日 20:00 河池站为时空分布最接近

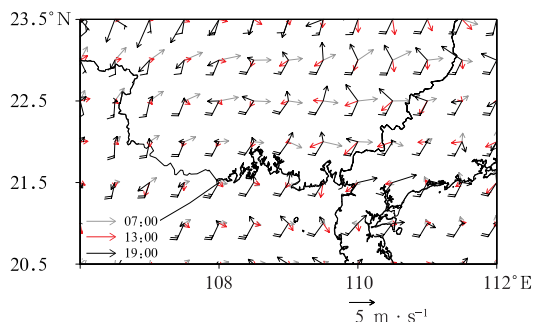


图 6 2023 年 3 月 25 日 850 hPa 非地转风场(箭矢)和日平均风场(风羽)

Fig. 6 850 hPa ageostrophic wind (arrow) and average wind field (barb) on 25 March 2023

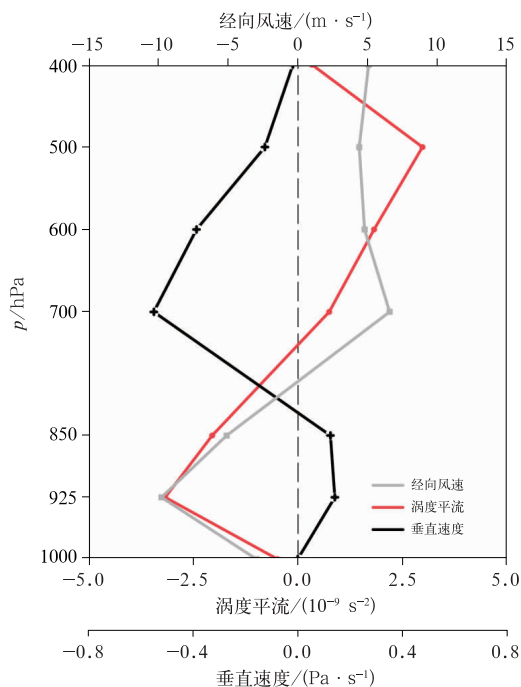


图 7 2023 年 3 月 25 日 19:00 区域($24^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $108^{\circ} \sim 109.5^{\circ} \text{E}$)平均的涡度平流、垂直速度以及经向风速的垂直廓线

Fig. 7 Vertical profile of the vorticity advection, vertical velocity and meridional wind speed averaged over the region ($24^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $108^{\circ} \sim 109.5^{\circ} \text{E}$) at 19:00 BT 25 March 2023

站点,将抬升点订正至 800 hPa 后 CAPE 值达到 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右),高架对流得以发展。

3.3 锋生强迫及大气湿斜压性促进南支对流带发展

前文分析表明,北支对流带的发生发展主要为锋后的高架过程,而南支对流带位于锋面附近,其演变与锋面的抬升强迫及结构形态密切相关,以下进行具体分析。

3.3.1 锋生强迫促进初始对流发生

南支对流约 25 日 22:00—23:00 在越南东北部一带触发,以下对初始对流的触发机制进行讨论。由于冷空气从偏东路径补充南下,配合广西西北高、东南低的特殊地形,25 日 23:00 冷锋位于广西南部一带并呈现倒 Ω 型,对应 925 hPa 上越南北部至广西南部一带的倒 Ω 型 θ_{se} 密集带(图 8a)。冷空气前锋南压造成明显的锋生强迫,强锋生中心主要位于越南东北部,极值中心超过 $35 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于对流系统触发。进一步分解后发现,水平锋生函数中变形项(图 8b)较辐合项(图 8c)的大

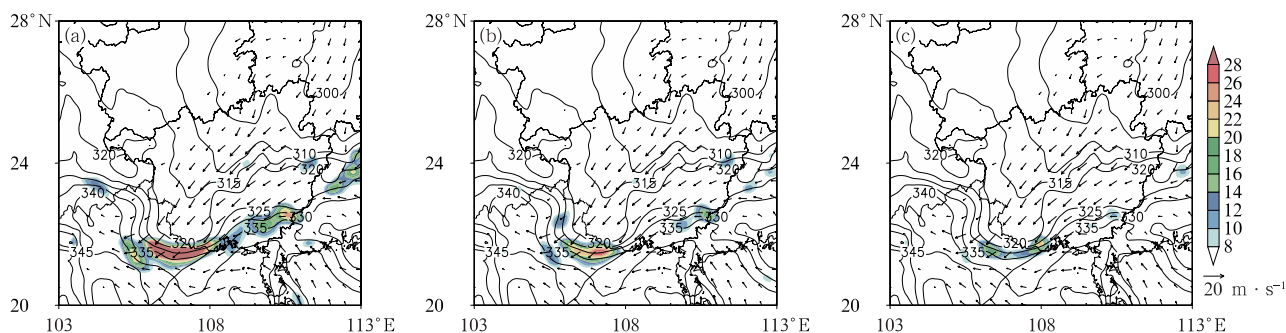


图 8 2023 年 3 月 25 日 23:00 的 925 hPa(a)锋生函数,(b)变形项,(c)辐合项
(填色,单位: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和 θ_{se} (等值线,单位:K)以及风场(箭头)的分布

Fig. 8 Distribution of 925 hPa (a) frontogenesis function and its (b) deformation term and
(c) convergence term (colored, unit: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),
 θ_{se} (contour, unit: K) and wind field (arrow) at 23:00 BT 25 March 2023

值区范围更大且强度更强,分别为 $20 \times 10^{-9} \sim 28 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $14 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,表明流场与等 θ_{se} 线配置形成的拉伸变形效应相较于冷暖空气的辐合作用在局地锋生强迫中贡献更大。由风场与等 θ_{se} 线分布可见,锋区上等 θ_{se} 线呈东西走向,偏东风在锋区西侧强于东侧,形成伸展轴,并与等 θ_{se} 线接近平行,锋区南北两侧偏东风和东北风构成的南北向收缩轴与等 θ_{se} 线垂直。在上述变形场中伸展轴的法向 θ_{se} 梯度加大,从而产生锋生强迫,促进对流触发。

由区域平均锋生函数和垂直速度的时间-高度演变可见(图 9),锋生作用在 25 日 19:00 以后开始逐渐增强,强中心位于 925 hPa 附近,于 22:00 达到最强,同时上升运动达到最强,925 hPa 之上均为上升运动,850 hPa 附近出现超过 $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强中心,使得对流触发。进一步分析越南北部的代表探空站,该站点位于对流触发区域 100 km 以内,能较好地反映触发地上空的大气层结条件。25 日 20:00,触发地上空的 CAPE 值维持在 $678.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,具备较好的能量条件。自由对流高度及抬升凝结高度均很低,分别为 1007.9 hPa 和 977.5 hPa。边界层锋生强迫产生的扰动将气块抬升到自由对流高度以上,触发对流。此外,925~600 hPa(825~600 hPa)上假相当位温(饱和假相当位温)随高度递减,表明大气层结条件不稳定,同时 K 指数超过 40°C ,SI 指数小于 -5°C ,均有利于对流触发后进一步发展。

3.3.2 大气湿斜压性促进对流系统组织性增强

南支对流系统在越南东北部触发后,东移经过

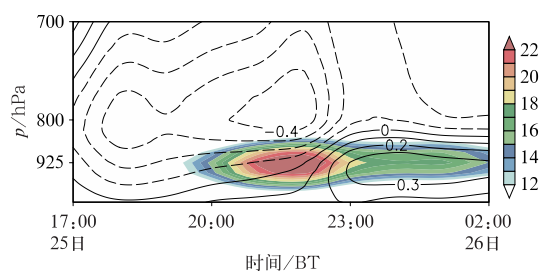
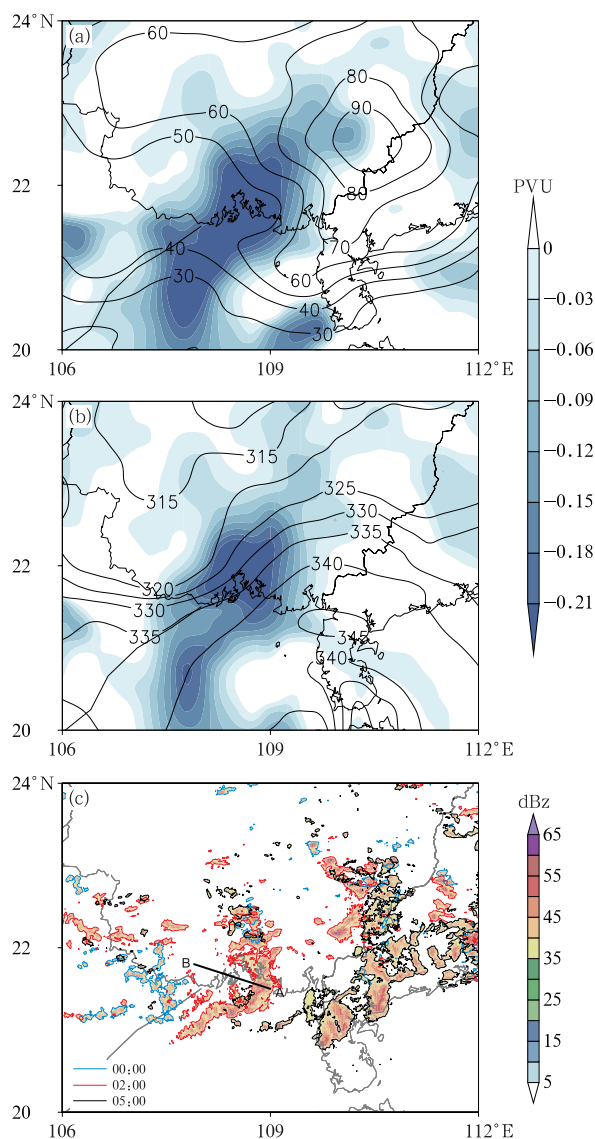


图 9 2023 年 3 月 25 日 17:00 至 26 日 02:00 区域
($21^\circ \sim 22^\circ\text{N}$, $106^\circ \sim 107^\circ\text{E}$) 平均的锋生函数
(填色,单位: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和垂直速度
(等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)的时间-高度演变

Fig. 9 Time-height variation of frontogenesis
function (colored, unit: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and
vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged
over the region ($21^\circ - 22^\circ\text{N}$, $106^\circ - 107^\circ\text{E}$)
from 17:00 BT 25 to 02:00 BT 26 March 2023

北部湾中部时组织化发展,形成弓形回波。由于 MPV2 反映了湿斜压锋区强度和垂直风切变的共同作用,既体现大气湿斜压性对对流发展的热力作用,也能体现对流系统组织化所需的动力配置,因此对该物理量进行分析。26 日 00:00—02:00,北部湾一带一直存在负值强中心,呈南北向分布(图 10a),表明该区域大气低层存在较强的湿斜压性。而湿斜压性则主要由 MPV2 中的 $g(\partial v / \partial p)(\partial \theta_{\text{se}} / \partial x)$ 项贡献,这与该区域锋区西南—东北向分布导致的较大 θ_{se} 纬向梯度(图 10b)以及强垂直风切变有关。分析北部湾代表站点北海站 25 日 20:00 的探空(图略),发现在对流系统经过前,该区域上空已维持较强的垂直风切变,0~3 km 和 0~6 km 垂直风切



注:图c中直线AB为图11的剖面。

图10 2023年3月26日(a,b)02:00 (a)925 hPa MPV2(填色)和500 hPa相对湿度(等值线,单位:%)及(b)925 hPa MPV2的 $g(\partial v/\partial p)(\partial \theta_{sc}/\partial x)$ 项(填色)和 θ_{sc} (等值线,单位:K),(c)雷达组合反射率因子(填色和等值线, ≥ 35 dBz)分布
Fig. 10 Distribution of (a) 925 hPa MPV2 (colored) and 500 hPa relative humidity (contour, unit: %), (b) 925 hPa $g(\partial v/\partial p)(\partial \theta_{sc}/\partial x)$ (colored) of MPV2 and θ_{sc} (contour, unit: K) at 02:00 BT 26 March, (c) radar composite reflectivity (colored and contour, ≥ 35 dBz) on 26 March 2023

变分别达到 $20.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $28.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以上热力、动力条件均有利于南支对流系统在东移经过北

部湾中部时组织化发展。除此之外,中层500 hPa上广西南部至北部湾一带维持相对湿度小于50%的干区,有利于对流系统发展过程中中层干空气夹卷形成后侧入流急流,因而使得26日02:00左右弓形回波逐渐成型(图10c),此时强对流天气主要以雷暴大风为主。26日05:00—08:00,对流系统东移至广西、广东交界一带,该区域大气湿斜压性较弱,这一方面是由于 θ_{sc} 梯度较小,另一方面由于垂直风切变较北部湾一带减弱(时空分布最接近的08:00阳江站探空显示,0~3 km和0~6 km垂直风切变分别约为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。同时,上述地区湿层较深厚,由于干空气夹卷减弱,弓形回波特征逐渐消失,对流带逐渐零散化,强天气也转为短时强降水。在上述热力、动力条件下对流系统趋于直立发展,组织性逐渐转差,开启自毁机制,南支对流过程结束。

在弓形回波发展旺盛的26日01:52,基于北海雷达沿图10c中直线AB作垂直剖面,具体分析对流系统的结构特征。可以看到大于30 dBz的回波顶高达8 km,45 dBz以上的回波质心高度最高可达6.5 km(图11a),超过0℃层及0℃湿球温度高度(25日20:00北海探空显示均为4 km左右)。回波结构密实,较强的垂直风切变使得强反射率因子主体随高度向下风方向(向东)倾斜。径向速度图(图11b)上可以看到明显的后侧入流急流,达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。干空气夹卷进入对流系统后由于蒸发效应使得后侧入流急流轴附近出现弱反射率区(图10c,图11a)。后侧入流急流与前侧入流辐合形成中层径向辐合(MARC),使得干空气下沉并在近地面层辐散,出流速度达到 $16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过雷达偏振量可以捕捉到更多细节,在超过45 dBz的强反射率因子区域存在差分反射率因子(Z_{DR})柱(最大值约在2.0~3.5 dB,图11c)以及差分传播相移率(K_{DP})柱($1.2 \sim 1.8^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,图11d),雨滴直径较大,但并不是很密集。此外,由于 Z_{DR} 柱与上升气流存在较好的对应关系,可用以识别出上升气流的位置以及雷暴云团的增长区(Ryzhkov et al, 1994; 楚志刚等, 2017),因而此时对流系统前侧较弱回波区的 Z_{DR} 柱对应了前侧低层活跃の入流上升运动,这一特征反映了对流系统仍处于不断发展阶段(袁媛等, 2022; 曾琳等, 2023),对于风暴的预警具有一定指示意义。

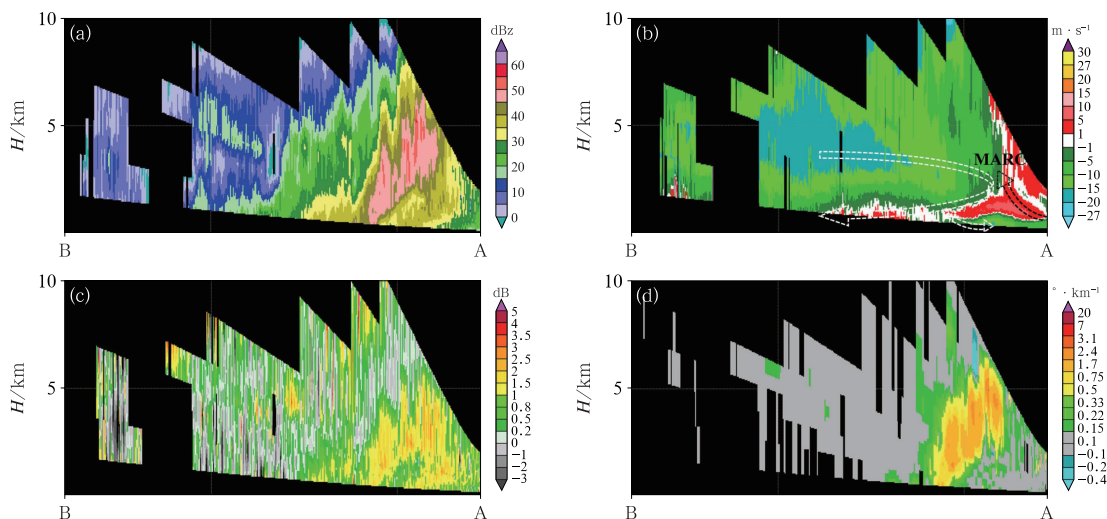


图 11 2023 年 3 月 26 日 01:52 北海雷达沿图 10c 直线 AB 的(a)反射率因子, (b)径向速度, (c)差分反射率因子和 (d)差分传播相移率的垂直剖面
Fig. 11 Cross-section of (a) reflectivity factor, (b) radial velocity, (c) Z_{DR} and (d) K_{DP} along the line AB in Fig. 10c of the Beihai Radar at 01:52 BT 26 March 2023

4 结论与讨论

2023 年 3 月 25 日 20:00 至 26 日 08:00, 广西出现一次双对流带过程, 强对流落区位于广西南部沿海及中北部, 呈东西向带状分布, 主、客观预报均出现明显偏差。基于多源观测以及 ERA5 再分析资料, 通过计算 T-N 波作用通量、湿位涡及水平锋生函数, 对此次过程的环流背景场以及大气层结演变进行了诊断分析, 给出此次过程的天气概念模型 (图 12), 主要结论如下:

(1) 过程发生于大尺度环流调整的背景下, 源自极涡的高纬度 Rossby 波列与源自黑海的南支中纬度波列共同促进了东北横槽在东移过程中逐渐转竖, 引导中高纬度冷空气补充南下。低纬地区南支槽在过程期间逐渐东移, 为广西地区冷垫之上的气团抬升提供一定动力条件, 同时也促进低层冷暖空气在广西沿海交汇。

(2) 条件对称不稳定层结配合中层涡度平流促进了北支对流带发展。随着冷空气补充南下、惯性振荡促使偏南风向北推进 (图 12a 中红色空心箭头), 冷暖空气在广西一带交汇明显增强, 大气湿斜

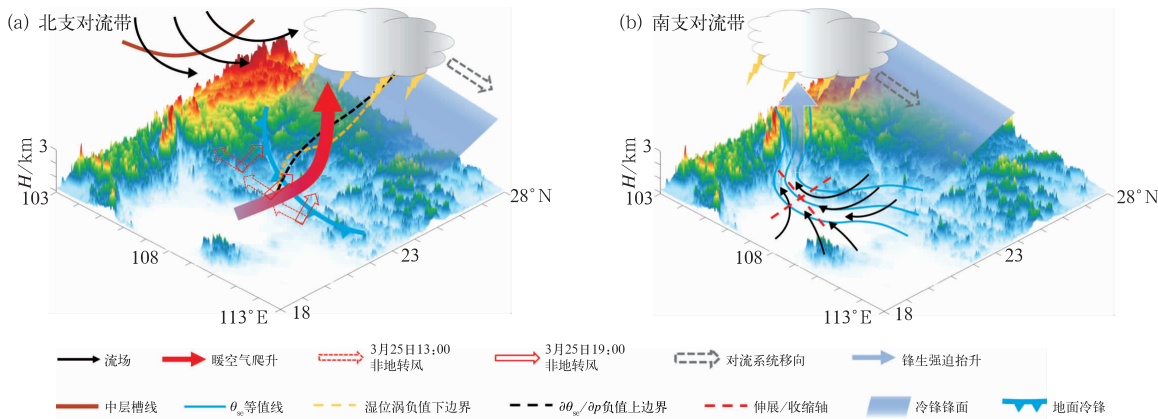


图 12 2023 年 3 月 25—26 日广西双对流强降水带过程概念模型
Fig. 12 Conceptual model for a process of the double-convective heavy precipitation bands from 25 to 26 March 2023 in Guangxi Province

压性的增强使得湿位涡发展,进而导致层结出现条件对称不稳定。暖湿空气自南向北倾斜爬升至700 hPa附近条件对称不稳定区(图12a中黄、黑色虚线)后,触发高架对流,释放不稳定能量。此外,高空槽前正涡度平流促进低层上升运动发展,也为高架对流的发生发展提供有利动力条件。

(3)冷空气深入南下后受广西西北高、东南低的特殊地形影响,等 θ_{se} 线密集带在广西南部一带呈现倒 Ω 型,其与流场的有利配置形成拉伸变形效应(图12b红色虚线)导致锋生强迫,使得越南东北部南支初始对流发生。北部湾中部低层较大的 θ_{se} 纬向梯度以及强垂直风切变使得该区域存在较强湿斜压性,促进了南支对流系统东移经过时组织化发展。此外,中层500 hPa存在干区,促进对流系统发展过程中由于干空气夹卷形成弓形回波。

本次过程与以往双雨带过程存在明显差异,而此类与锋面、高架对流相关的双雨带过程在广西一带时有发生,其中具有统计意义的预报指标有待未来通过更多个例研究总结。此外,以往双雨带的预报难点主要集中于锋前暖区的南支雨带,而此次过程预报偏差主要为锋后高架对流产生的北支雨带,建议实时业务中增加MPV1和MPV2物理量诊断,增强预报员对春季对称不稳定类对流的预报信心,而数值预报模式对于此类双对流带/双雨带的预报偏差来源及订正技巧也值得进一步探讨。春季,当锋面南压到广西沿海地区后,由于云南南部到中南半岛观测资料稀缺,高原南部短波槽东移时缺少指示性信息,可以通过对数值模式在中南半岛到华南山南雨带落区和走向,特别是对流性降水的主要落区,获取短波槽东移信息,来辅助判别短波槽叠加在低层锋区上的降水性质和强度。而锋后对称不稳定层结上,当700 hPa和500 hPa温差 $\geq 16^{\circ}\text{C}$ 时,同时数值模式预报四川南部到贵州有低槽东移时,倾斜对流极易启动且东移加强,造成列车效应,引发强降水。

参考文献

陈涛,陈博宇,于超,等,2020.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,46(9):1129-1142. Chen T, Chen B Y, Yu C, et al, 2020. Analysis of multiscale features and ensemble forecast sensitivity for MCSs in front-zone and warm sector during pre-summer rainy season in South China[J]. Meteor Mon, 46(9): 1129-1142 (in Chinese).

楚志刚,胡汉峰,黄兴友,等,2017.窄波束C波段双偏振多普勒天气

雷达及其探测能力分析[J].高原气象,36(4):1072-1081. Chu Z G, Hu H F, Huang X Y, et al, 2017. The narrow beam C-band dual-polarization Doppler weather radar of NUIST and its performance analysis[J]. Plateau Meteor, 36(4): 1072-1081 (in Chinese).

邓承之,张亚萍,方德贤,等,2019.一次纬向暴雨过程的湿对称不稳定与锋生分析[J].气象,45(11):1527-1538. Deng C Z, Zhang Y P, Fang D X, et al, 2019. Analysis on moist symmetric instability and frontogenesis of one zonal torrential rain[J]. Meteor Mon, 45(11): 1527-1538 (in Chinese).

丁治英,王爽,高松,2017.一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,40(5):653-662. Ding Z Y, Wang S, Gao S, 2017. Potential vorticity evolution of a double rainbands storm in South China and interactions between the rainbands[J]. Trans Atmos Sci, 40(5): 653-662 (in Chinese).

丁治英,朱莉,常越,等,2009.一次连续性暴雨中双雨带的成因分析[J].热带气象学报,25(6):697-705. Ding Z Y, Zhu L, Chang Y, et al, 2009. Research on the causes of double rain belts during a sustained rainstorm[J]. J Trop Meteor, 25(6): 697-705 (in Chinese).

林宝亭,陆秋霖,林确略,等,2020.一次玉林地区漏报的强双雨带影响的过程分析[J].气象,46(3):313-324. Lin B T, Lu Q L, Lin Q L, et al, 2020. Process analysis of a missing-forecast severe double rain belt in Yulin[J]. Meteor Mon, 46(3): 313-324 (in Chinese).

林确略,寿绍文,杨华,2015.基于数值模拟对一次广西前汛期回流暴雨形成机制的分析[J].气象,41(7):852-862. Lin Q L, Shou S W, Yang H, 2015. Analysis on formation mechanism of the backflow rainstorm occurring in first rainy season of Guangxi based on numerical simulation[J]. Meteor Mon, 41(7): 852-862 (in Chinese).

林确略,赵华生,林宝亭,2020.双雨带过程中的回流暖区暴雨两个例对比研究[J].热带气象学报,36(6):721-733. Lin Q L, Zhao H S, Lin B T, 2020. Comparative analysis on backflow warm-sector rainstorm cases in double rain belts process[J]. J Trop Meteor, 36(6): 721-733 (in Chinese).

罗建英,廖胜石,黄归兰,等,2009.广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J].气象,35(10):50-57. Luo J Y, Liao S S, Huang G L, et al, 2009. Numerical simulation and analysis on a heavy rain process in the warm sector in Guangxi[J]. Meteor Mon, 35(10): 50-57 (in Chinese).

毛程燕,荆思佳,潘欣,等,2021.浙江一次江淮气旋后部强对流暴雨过程诊断研究[J].热带气象学报,37(4):530-540. Mao C Y, Jing S J, Pan X, et al, 2021. Diagnostic research of severe convective rainstorm event at the back of a Jiang-Huai cyclone in Zhejiang Province[J]. J Trop Meteor, 37(4): 530-540 (in Chinese).

农孟松,赖珍权,梁俊聪,等,2013.2012年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析[J].气象,39(7):874-882. Nong M S, Lai Z Q, Liang J C, et al, 2013. Analysis on elevated thunderstorm hail in Guangxi in early spring of 2012[J]. Meteor Mon, 39(7): 874-882 (in Chinese).

农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等,2014.广西一次飑线大风天气的成因和

- 预警分析[J]. 气象, 40(12):1491-1499. Nong M S, Zhai L P, Qu M F, et al, 2014. Study on initialization mechanism and alert of gale in squall line storm event[J]. Meteor Mon, 40(12):1491-1499(in Chinese).
- 蒲义良, 卢栩诗, 胡胜, 等, 2023. 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, 49(2):201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2):201-212(in Chinese).
- 覃皓, 刘乐, 农孟松, 等, 2023a. 广西一次持续性暴雨过程中低空急流的作用及其特征[J]. 暴雨灾害, 42(6):640-647. Qin H, Liu L, Nong M S, et al, 2023a. The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi[J]. Torr Rain Dis, 42(6):640-647(in Chinese).
- 覃皓, 王志毅, 石怡宁, 等, 2023b. 广西沿海一次冬季暖区暴雨的多尺度能量诊断[J]. 暴雨灾害, 42(3):283-292. Qin H, Wang Z Y, Shi Y N, et al, 2023b. Multiscale diagnosis of the energy budget for a warm-sector rainstorm event in winter in the coastal area of Guangxi[J]. Torr Rain Dis, 42(3):283-292(in Chinese).
- 覃皓, 伍丽泉, 石怡宁, 等, 2023c. 能量转化视角下一次引发冬季区域强对流的南支槽研究[J]. 气象, 49(3):304-317. Qin H, Wu L Q, Shi Y N, et al, 2023c. Study on the southern branch trough inducing a winter regional severe convection from the perspective of energy conversion[J]. Meteor Mon, 49(3):304-317(in Chinese).
- 覃武, 刘国忠, 赖珍权, 等, 2020. 华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨[J]. 气象, 46(8):1039-1052. Qin W, Liu G Z, Lai Z Q, et al, 2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. Meteor Mon, 46(8):1039-1052(in Chinese).
- 王华, 李宏宇, 仲跻芹, 等, 2019. 京津冀一次罕见的双雨带暴雨过程成因分析[J]. 高原气象, 38(4):856-871. Wang H, Li H Y, Zhong J Q, et al, 2019. The formation of an unusual two-belt heavy rainfall around Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. Plateau Meteor, 38(4):856-871(in Chinese).
- 吴乃庚, 林良勋, 冯业荣, 等, 2013. 2012年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析[J]. 气象, 39(4):410-417. Wu N G, Lin L X, Feng Y R, et al, 2013. Analysis on the causes of an elevated thunderstorm in early-spring of South China[J]. Meteor Mon, 39(4):410-417(in Chinese).
- 袁媛, 孙康远, 陈刚, 等, 2022. 南京地区一次强降水超级单体过程的双偏振雷达观测分析[J]. 气象科学, 42(6):825-834. Yuan Y, Sun K Y, Chen G, et al, 2022. Analysis of a supercell storm caused intense rainfall in Nanjing City by using polarimetric radar observations[J]. J Meteor Sci, 42(6):825-834(in Chinese).
- 曾琳, 张羽, 李浩文, 等, 2023. 2020年5月22日广州强降水超级单体的S波段双偏振雷达回波分析[J]. 气象科学, 43(2):235-244. Zeng L, Zhang Y, Li H W, et al, 2023. Analysis of S-band dual-polarization radar echo of heavy precipitation supercell in Guangzhou on May 22, 2020[J]. J Meteor Sci, 43(2):235-244(in Chinese).
- 张晓惠, 倪允琪, 2009. 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, 67(1):108-121. Zhang X H, Ni Y Q, 2009. A comparative study of a frontal and a non-frontal convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 67(1):108-121(in Chinese).
- 智协飞, 李佳, 张玲, 2022. 双低空急流影响下华南初夏降水日变化的时空分布特征[J]. 大气科学学报, 45(3):444-455. Zhi X F, Li J, Zhang L, 2022. Temporal and spatial distributions of diurnal cycle of early-summer precipitation in South China influenced by double low-level jets [J]. Trans Atmos Sci, 45(3):444-455(in Chinese).
- Blackadar A K, 1957. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions[J]. Bull Amer Meteor Soc, 38(5):283-290.
- He W Y, Sun B, Wang H J, 2021. Dominant modes of interannual variability in atmospheric water vapor content over East Asia during winter and their associated mechanisms[J]. Adv Atmos Sci, 38(10):1706-1722.
- Hong X W, Lu R Y, Li S L, 2018. Asymmetric relationship between the meridional displacement of the Asian westerly jet and the Silk Road pattern[J]. Adv Atmos Sci, 35(4):389-396.
- Hoskins B J, Ambrizzi T, 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow[J]. J Atmos Sci, 50(12):1661-1671.
- Li Z Y, Yang Q, Yuan D, et al, 2023. Causes of a typical southern flood and northern drought event in 2015 over eastern China [J]. Adv Atmos Sci, 40(11):2092-2107.
- Luo X Y, Huang X G, Fei J F, et al, 2023. Role of topography in triggering elevated thunderstorms associated with winter cold fronts over the eastern Yunnan-Guizhou Plateau[J]. J Geophys Res: Atmos, 128(8):e2023JD038640.
- Ryzhkov A V, Zhuravlyov V B, Rybakova N A, 1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and precipitation[J]. J Atmos Ocean Technol, 11(1):132-139.
- Sun X G, Tao L F, Yang X Q, 2018. The influence of oceanic stochastic forcing on the atmospheric response to midlatitude North Pacific SST anomalies [J]. Geophys Res Lett, 45(17):9297-9304.
- Takaya K, Nakamura H, 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. J Atmos Sci, 58(6):608-627.
- Yang S, Gao S T, Lu C G, 2014. A generalized frontogenesis function and its application[J]. Adv Atmos Sci, 31(5):1065-1078.
- Zhang Y H, Xue M, Zhu K F, et al, 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of summer precipitation in Sichuan Basin, China? The key role of boundary layer low-level jet inertial oscillations[J]. J Geophys Res Atmos, 124(5):2643-2664.

(本文责编:张芳)