钦州“5·19”极端暴雨特征及成因分析

屈梅芳[1,2] 周云霞[1] 农孟松[1] 覃 皓[1] 屈红梅[3] 赖珍权[1]

1 广西壮族自治区气象台，南宁 530022

2 北部湾国家气候观象台开放实验室，南宁 530022

3 广西壮族自治区桂林市临桂区气象局，临桂 541199

提 要：利用多源观测资料及 ERA5 再分析资料，对 2024 年 5 月 19 日广西钦州暖区极端强暴雨的降雨特征、环流背景、水汽输送特征及风暴的精细化结构特征等多个方面进行了分析。结果表明，此次极端暴雨过程小时降雨量突破广西极值，具有显著极端性。高层辐散、低层辐合及深厚暖湿层结为暴雨提供了有利环境。异常强的边界层水汽输送也是此次暴雨的重要成因。边界层东南急流水汽通量距平达 3 倍标准差，呈显著极端性，越南北部降雨造成的低值系统发展导致的向西气压梯度力加大是偏东风急流加强的主要原因。对流单体在地面中尺度锋区附近持续生成、合并，东南暖湿入流与冷池偏北出流交汇，使风暴在强降雨区附近维持。风暴前侧中γ尺度涡旋持续增强，并伴随强回波向高层伸展，站点降雨峰值早于涡旋切变峰值。异常水汽输送、低层辐合及对流组织化发展共同形成了此次极端降雨。

关键词：极端降雨，水汽输送异常，中γ尺度涡旋

中图分类号：P458 文献标志码：A **doi：**10.7519/j.issn.1000-0526.2026.101101

Characteristics and Mechanisms of the Extreme Rainstorm in Qinzhou on 19 May 2024

QU Meifang[1,2] ZHOU Yunxia[1] NONG Mengsong[1] QIN Hao[1]

QU Hongmei[3] LAI Zhenquan[1]

1 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

2 Open Laboratory of Guangxi Beibu Gulf National ClimateObservatory, Nanning 530022

3 Lingui Meteorological Station of Guilin, Guangxi, Lingui 541199

Abstract: Multisource observations and ERA5 reanalysis data are used to analyze the rainfall characteristics, atmospheric circulation, moisture transport, and fine-scale storm structure of an extreme warm sector rainstorm in Qinzhou, Guangxi, on 19 May 2024. The event set a new hourly rainfall record for Guangxi. Upper-level divergence, low-level convergence, and a deep, warm, moist layer provided favorable environmental conditions. Moisture transport by the southeasterly boundary layer jet was unusually strong, with moisture flux reaching three standard deviations above the climatological mean. The easterly jet strengthened primarily in response to an increased

中国气象局复盘总结专项(FPZJ2026-095)、广西气象科研计划项目(桂气科 2025Z01)和广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026342)共同资助

2025 年 7 月 4 日收稿；2026 年 10 月 11 日收修定稿

第一作者:屈梅芳，主要从事灾害性天气预报及其相关方法研究. E-mail:305395408@qq.com

通讯作者:周云霞，主要从事灾害性天气机理研究. E-mail:13878131128@163.com

westward pressure gradient force as a rainfall-induced low pressure system developed over northern Vietnam. Convective cells repeatedly formed and merged near a surface mesoscale frontal zone. Warm, moist southeasterly inflow converged with northerly cold-pool outflow, sustaining the storm over the heavy-rainfall area. A meso-γ-scale vortex on the storm's forward flank intensified as strong radar echoes extended to higher altitudes. Peak rainfall at surface stations preceded peak vortex shear. Anomalous moisture transport, low-level convergence, and the organization of convection together contributed to the extreme rainfall.

Key words: extreme precipitation, anomalous moisture transport, meso-γ-scale vortex

引　言

极端降雨是全球范围内最具破坏性的自然灾害之一，常引发洪涝和地质灾害，威胁人民生命财产安全。在全球变暖的背景下，极端降雨的频率和强度呈增加趋势（IPCC, 2023; 周佰铨和翟盘茂, 2023），有必要进一步研究其发生发展机理。国内外学者围绕极端降雨的特征及成因开展了广泛研究（Liu et al, 2015; 陈红专, 2021; 杨磊等, 2023）。极端降雨受副热带高压、季风槽等大尺度环流背景调控（Jiang et al, 2017），也与低涡、切变线等天气尺度系统及水汽、动力条件密切相关（林良勋等, 2006; 肖红茹等，2025；官晓军等，2025）。

暖区强降雨常伴随低空急流增强或边界层急流发展（林良勋等, 2006; 何立富等, 2016; 曾智琳等, 2019）。学者们通过统计分析将沿海暖区暴雨划分为偏南向型与西南向型两类，指出偏南风影响下降雨发生频率更高、强度更大，低层南风辐合是其关键机制之一（丁治英等, 2011; 陈翔翔等, 2012;刘瑞鑫等, 2019）。边界层急流的生消及强度变化对暖区暴雨具有重要影响，其中，边界层偏南急流的演变在华南沿海极端降雨过程中起关键作用（蔡景就等, 2019; 陈芳丽等, 2021）。夜间西南急流的建立则通过改变风场结构影响对流发生（曾智琳等, 2019）。

在中、小尺度上，多数极端降雨事件伴随中尺度对流组织化发展（Luo et al, 2013；Xu et al, 2012）。这些中尺度对流系统往往呈准静止或缓慢移动状态，伴随后向传播、列车效应等特征。冷池及其出流边界不断抬升前侧暖湿空气，持续触发新的对流单体，从而促发极端降雨（Liu et al, 2018）。中尺度涡旋（如中气旋、低涡等）也是降雨系统中的重要组织化结构，可通过自身的涡旋动力场组织和维持对流，延长降雨系统寿命，并显著提高局地降雨效率（俞小鼎, 2012; 孙继松等, 2015）。许多极端暴雨中心与中尺度涡旋的活动密切相关（Huang et al, 2019; Zeng and Wang, 2022; 杨磊等, 2023）。近年研究还发现，降雨过程中的凝结潜热释放也可能通过增强低层辐合，促进涡旋形成与增强（Zhang et al, 2022）。目前对这类涡旋结构、形成机理及其与降雨相互关系的认识仍不充分。

上述研究揭示了极端降雨的形成机制，总结出一些典型模型，加深了预报员对极端降雨的认识。然而，不同个例的发生原因和演变过程往往存在差异，仍需通过区域个例研究，为提高预报准确性和防灾减灾能力提供依据。本文利用多源观测资料和欧洲中期天气预报中心ERA5 再分析资料，分析广西一次极端降雨过程的环流背景、影响系统的热动力结构与维持

机制，以及中尺度对流系统的精细结构和演变特征，探讨此次极端强降雨的天气动力学成因，为同类过程的预报预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

本文采用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的 ERA5 再分析数据开展诊断分析，其水平分辨率为 0.25°×0.25°。观测资料包括地面自动气象站逐时观测数据和分钟级降雨资料、北海探空站观测资料、GNSS/MET 反演的大气可降水量(precipitable water vapor，PWV)资料、风云四号 A 星（FY-4A）逐时云顶黑体亮温（black body temperature,简称 TBB）资料、SWAN 雷达组合反射率拼图资料以及广西防城港市双偏振多普勒天气雷达资料。

1.2 方法

1.2.1 边界层东风急流发展成因诊断

为分析边界层东风急流增强的原因，采用纬向动量方程开展动量收支诊断（Du et al, 2014; Kong et al, 2020）：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\left(-u\frac{\partial u}{\partial x}-\mathrm{v}\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\omega\frac{\partial u}{\partial p}-\frac{\partial \Phi}{\partial x}+fv+F_x \tag{1}$$

式中：u 和 v 分别为纬向风和经向风，p 为气压，Φ为位势，f 为科氏参数，ω为 p 坐标系垂直速度。方程左端为纬向风局地变化项，表征急流强度随时间的变化；右端依次为水平平流项、垂直输送项、纬向气压梯度力项、科氏力项和残差项。其中，残差项由纬向风局地变化项与其余各项之差得到，包含湍流摩擦等未显式计算的过程。

1.2.2 标准化异常

对于极端降雨事件，通常采用环流形势和要素场的标准化异常（D_s）来表示其极端性（Hart and Grumm, 2001），D_s 是表征气候变量场偏离常态的重要指标，其表达式为：

$$D_s=(X-\mu)/\sigma \tag{2}$$

式中：D_s 代表标准化异常，用以衡量变量场偏离其气候态的程度。X 表示变量在某一特定时刻的值，μ 和 σ 分别为该变量同期气候平均值和标准差。气候态取 1991—2020 年以目标日期为中心前后各 10 d 的 21 d 滑动样本。通常，当异常达到 2.5σ—3σ 时，表明该要素具有显著异常，此时大气环境展现出较为显著的极端性。

2 降雨极端性分析

2024 年 5 月 17 日 20 时到 19 日 20 时，广西出现了入汛以来最强暴雨过程，钦州、防城港、北海、南宁等市多个乡镇降雨量超过 250 mm（图 1a），其中钦州市钦南区龙门港镇过程降雨量最大，达 752 mm。19 日 02—03 时，龙门港镇小时降雨量达 189.6 mm，打破广西小时降雨量历史纪录，最大滑动小时雨量达 204 mm（19 日 02:13—03:12），超过郑州 2021 年“7 20”极端暴雨过程的最大小时雨量 201.9 mm。此次过程最强降雨时段出现在 18 日 20 时到 19 日 12 时，根据主要影响系统，强降雨区可分为冷锋后的桂东北降雨区（落区一）、冷锋附近的桂中降雨区（落区二）和锋前暖区沿海降雨区（落区三）。18—19 日广西中部及

南部沿海多站次出现极端短时强降雨，其中 19 日 00—08 时范围最大，强度最强，南宁、钦州、北海多地雨强超过 100 mm h^{-1}，而落区一几乎未出现极端短时强降雨。选取落区一桂林象山区平山站、落区二的南宁武鸣区东风农场站和落区三的钦州钦南区龙门港站作为代表站，分析其降雨演变（图 1b），东风农场站和龙门港站的强降雨主要集中在 19 日 00—12 时，且都出现了超过 100 mm h^{-1} 的强降雨，而平山站 19 日凌晨雨强低于 10 mm·h^{-1}，09 时起有所增大，但均未超过 50 mm·h^{-1}。三个落区中，落区三雨强最强，持续时间最长，累计雨量最大。综合来看，广西沿海是此次过程降雨最强的区域，强降雨时段集中，极端性突出。其中，龙门港镇小时降雨量和日降雨量分别突破广西小时降雨量和钦州市日降雨量历史极值。因此，本文重点分析沿海暖区暴雨的发生发展过程。

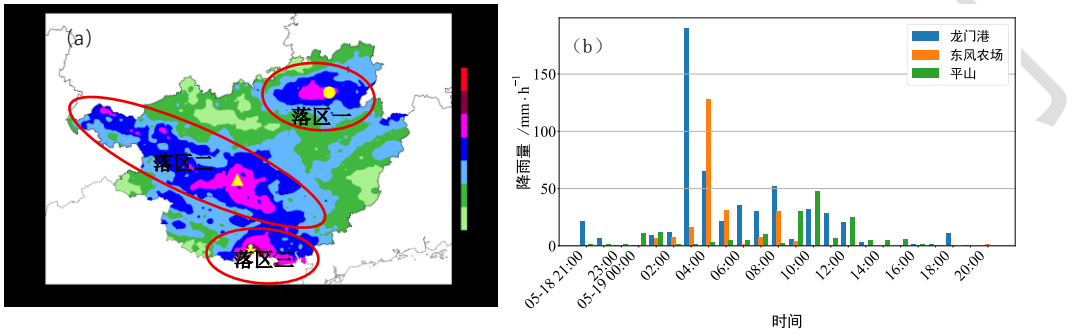


图 1　2024 年 5 月 18 日 20 时-19 日 20 时广西降雨量（a）和三个降雨落区代表站小时降雨演变（b），图中黄色圆形、三角形和五角星分别代表平山、东风农场、龙门港站位置

Fig.1　(a)Observed accumulated precipitation，(b) Hourly precipitation at three representive stations from 18 to 19 May 2024. The yellow circle, triangle, and star symbols indicate the positions of Pingshan, Dongfeng Farm, and Longmengang Station respectively

3　大气环流背景条件

3.1　环流形势

2024 年 5 月 18 日，200 hPa 南亚高压位于中南半岛上空，19 日 02 时中心西退到 80° E，其东侧分流辐散持续增强，最强辐散中心位于广西沿海，有利于低层辐合系统发展。500 hPa 中高纬环流呈两槽一脊型，四川北部和我国东海沿岸各有一个低涡环流稳定维持，西部低涡不断分裂短波槽，东移影响广西；西太平洋副热带高压（简称西太副高）呈东西带状分布，脊线位于 15° N 附近（图 2a）。850 hPa 低涡从桂西北进入广西，广西受低涡前侧偏南急流控制，急流最大风速达 18 m s^{-1}（图 2b）。925 hPa 及更低层，来自南海、西太平洋的偏东南气流与来自孟加拉湾的西南气流辐合，沿海强降雨区位于 950 hPa 东南急流顶部温暖潮湿（θ_e>355 K）的风速辐合区中（图 2c）。散度和垂直速度的垂直剖面显示（图 2d），沿海降雨区低层辐合主要位于 900 hPa 以下，上升运动中心垂直速度达−1.8 hPa s^{-1}，低层辐合及上升运动强中心与强降雨区对应较好。

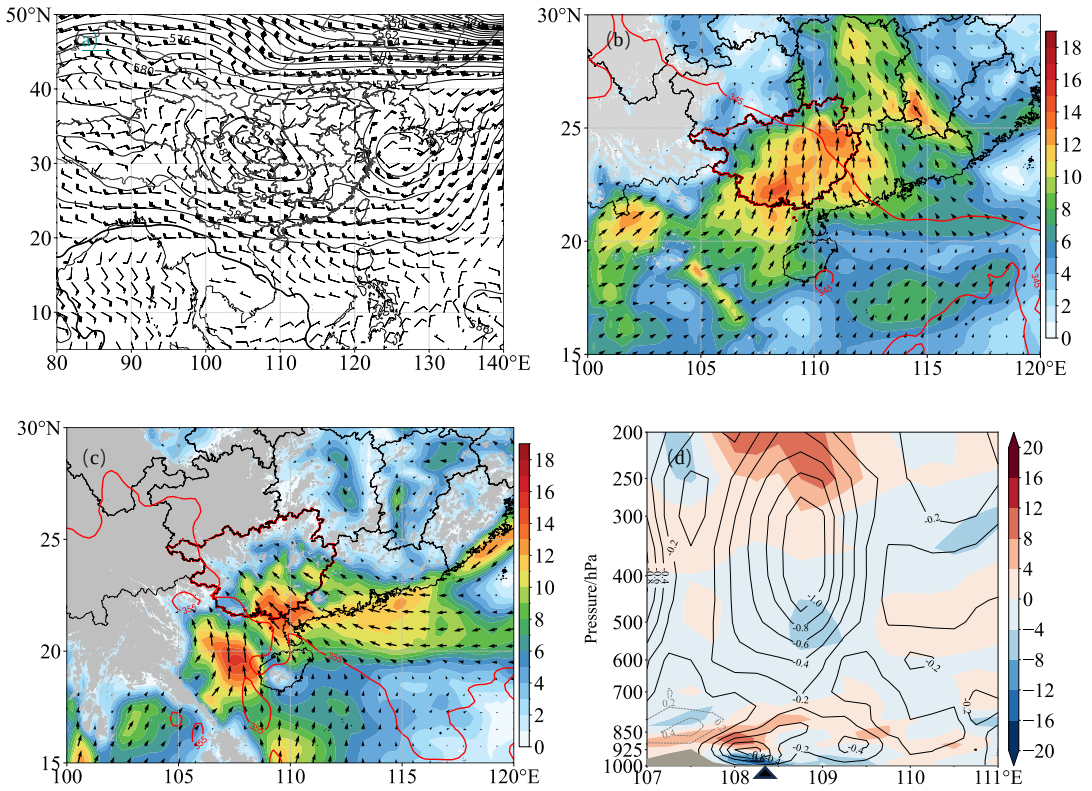


图 2　2024 年 5 月 19 日 02 时（a）500hPa 位势高度（等值线，单位：dagpm）及风场（风羽），（b）850hPa 风速（填色，单位：m s^{-1}）及风场（箭头）及假相当位温 345K 等值线（红色线），（c）950hPa 风速（填色，单位：m s^{-1}）及风场（箭头）及假相当位温 355K 等值线（红色线），（d）沿 21.7 ℃ 的散度（填色，单位：10^{-5} s^{-1}）和垂直速度（等值线，单位：hPa s^{-1}）垂直剖面（黑色三角形处为最大降雨中心）

Fig.2　(a) 500 hPa geopotential height (contours，unit：dagpm) and wind field (wind barbs); (b) 850 hPa wind speed (shaded，unit：m s^{-1}) , wind field (arrows) , and the 345 K pseudo-equivalent potential temperature contour (red line); (c) 950 hPa wind speed (shaded，unit：m s^{-1}) , wind field (arrows) , and the 355 K pseudo-equivalent potential temperature contour (red line); and (d) vertical cross-section along 21.7 ℃ of divergence (shaded，unit：10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity field (contours，unit：hPa s^{-1}) at 02:00 BT 19 May 2024. The black triangle marks the location of the rainfall maximum

3.2　环境条件

此次广西沿海出现破纪录小时雨强，其形成与特定的环境配置和云物理过程密切相关。充足的低层水汽和强盛的云底上升运动有利于水汽输送与凝结，而环境湿度、干空气夹卷及降水粒子的蒸发损耗则影响降雨效率。整层大气相对湿度大、中高层无干冷空气侵入的环境，有利于减少水汽损耗，促进水汽凝结转化，形成高效率降雨。

钦州降雨始于 18 日 20 时之后，因此选取距钦州最近的北海探空站 18 日 20 时观测资料，分析降雨前的大气层结和环境条件。图 3a 显示，降雨前湿层深厚，低层温度廓线接近干绝热线，对流有效位能（CAPE）达 1309 J kg^{-1}，K 指数为 40 ℃，抬升凝结高度（LCL）仅为 385 m，对流抑制能量（CIN）为 9.1 J kg^{-1}，表明环境能量充足，有利于对流触发。对流层中层为偏西风，无明显干冷空气侵入，有利于水汽高效凝结。0 ℃层高度为 5.2 km，以 LCL

至 0 ℃层的厚度估算，暖云层厚度达 4.8 km。已有研究指出，较厚的暖云层有利于提高降水效率（沈晓玲等, 2024）。本次过程暖云层深厚，配合高湿环境，为高效降雨提供了有利条件。

18 日 20 时起，钦州西南侧附近的防城站 PWV 不断升高（图 3b），19 日 01 时跃增到 69.1 mm，02—03 时继续上升超过 70 mm，充沛的水汽随增强的偏南风输送至钦州，结合深厚高湿环境，表明强降雨发生前 6 h 存在明显增湿过程。

18 日 20 时北海探空资料显示，0—1、0—3 和 0—6 km 垂直风切变分别为 7、16.6 和 19.7 $m·s^{-1}$。至 19 日 08 时（图略），0—3 km 的垂直风切变增大到 17.5 m s^{-1}，0—6 km 的垂直风切变增大到 30.4 m s^{-1}，垂直风切变增强有利于风暴组织化发展，并可为中层中尺度涡旋的形成提供初始环境水平涡度。低层垂直风切变的加强主要与 850 hPa 西南风加大有关，偏南风增强同时加强了水汽输送，有利于降雨强度增大。

降雨前深厚的湿层、较厚的暖云层及较小的对流抑制，为对流发展和高效降雨提供了有利环境。偏南风增强进一步加强了水汽输送，探空资料也显示低层至深层垂直风切变增大，促进风暴组织化发展，为强降雨的发生发展提供了有利环境。

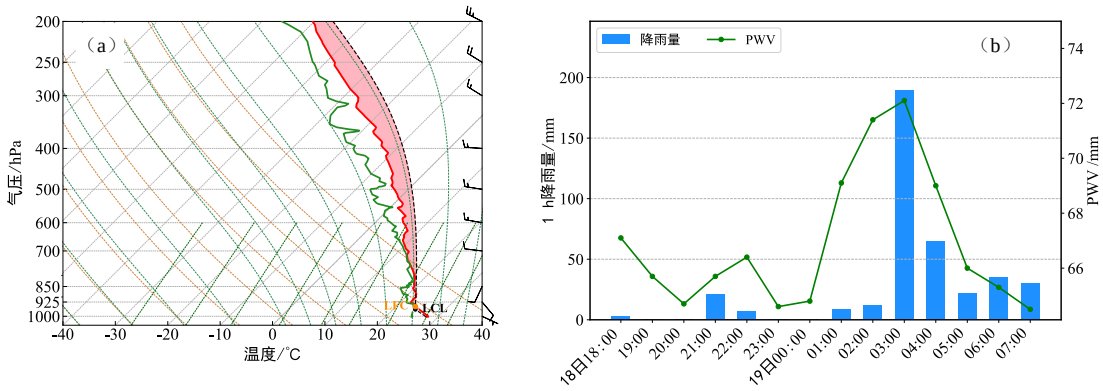


图 3　（a）2024 年 5 月 18 日 20 时北海探空图，（b）大气可降水降雨量及龙门港站降雨（随时间演变

Fig.3　(a) T-ln*p* diagram of Beihai at 20:00 BT 18 May 2024; (b) time series of precipitable water and hourly rainfall at Longmengang station

4　极端降雨成因

4.1　异常强的边界层水汽输送

5 月 18—19 日，副热带高压加强西伸，中心位于贵州的低涡不断增强并南移进入广西，两者间的位势高度梯度不断加大，促使 925 hPa 以下东南气流逐渐加强，在广西沿海形成风速 12~16 m s^{-1} 的急流区（图 4b）。来自南海和西太平洋的强劲东南气流为此次极端暴雨提供了充沛的水汽和有利的热力条件。同时，来自北部湾海面的偏南气流构成了另一支水汽输送通道，与东南气流在广西沿海上空辐合，持续为暴雨区输送水汽。

为评估此次水汽输送的异常程度，计算了 950 hPa 风场距平、水汽通量距平及水汽通量的标准化异常。图 4c、4d 显示，18 日 08—20 时，东南急流和偏南急流的水汽通量异常均增强，其中东南急流增幅最明显，水汽通量距平从 5 g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1} 增至 12 g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}，

偏东风风速距平增至 8~12 m s^{-1}，两支气流在广西沿海汇合，形成较强的水汽辐合。水汽通量标准化异常分布表明，18 日 20 时东南风一侧的水汽通量距平达 3 倍标准差（图 4d），说明东南急流的水汽输送显著偏强，具有极端性，可能是此次广西南部极端强降雨形成的原因之一。

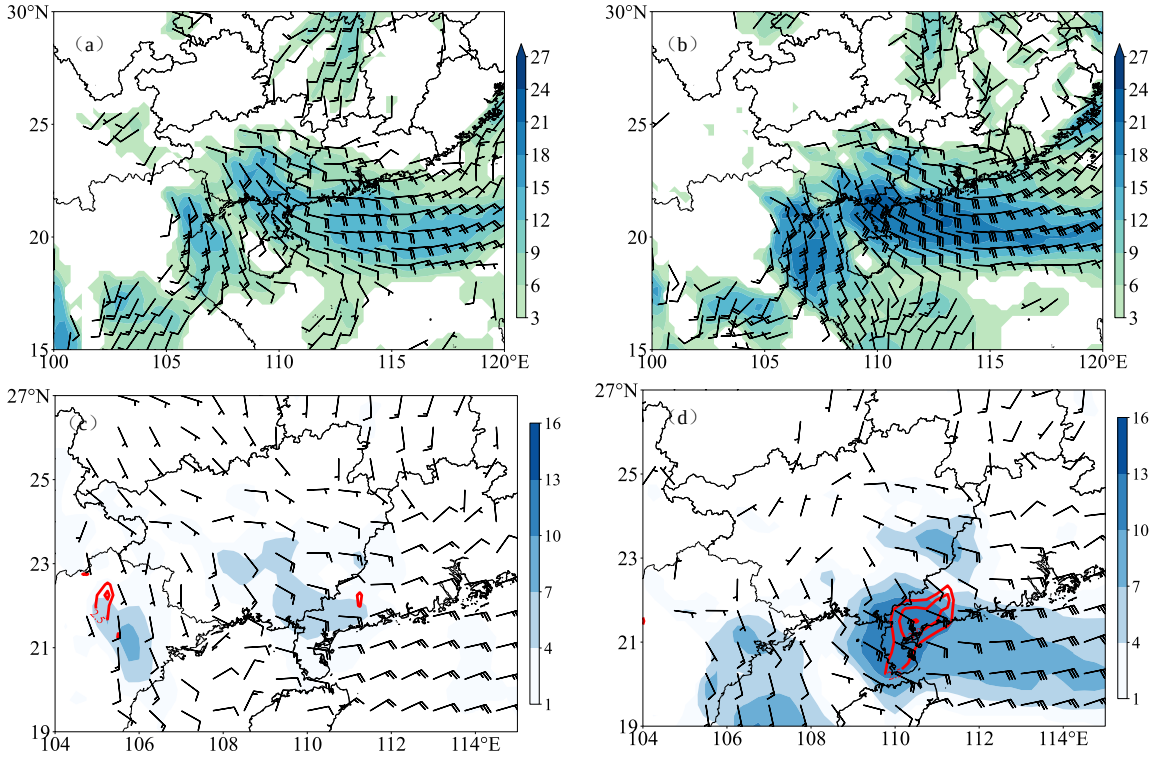


图 4　（a、b）950hPa 水汽通量（填色，单位：g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}）和风场（风向杆），（c、d）950hPa 风场距平（风向杆）、水汽通量距平（填色，单位：g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}）及标准化异常（等值线）（其中 a、c 为 2024 年 5 月 18 日 08 时，b、d 为 2024 年 5 月 18 日 20 时）

Fig.4　(a, b) 950hPa water vapor flux (shaded，unit：g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}) and wind field (wind barbs); (c，d) 950hPa wind anomaly (wind barbs), water vapor flux anomaly (shaded，unit：g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}), and standardized water vapor flux anomaly (contours) for (a，c) 8:00 BT and (b，d) 20:00 BT on 18 May 2024

4.2　边界层急流发展成因

利用式（1）对降雨区纬向风动量收支进行分析。图 5 给出极端降雨时刻（19 日 03 时）前 6 h 平均的 950 hPa 纬向动量方程各项分布，等值线表示式（1）左侧纬向风变化项，负值表示东风增强。强降雨发生前，沿海东风增强，增长率最大达-2×10^{-4} m s^{-2}。

各项中，气压梯度力项对东风增强的贡献最大，达-9×10^{-4} m s^{-2}（图 5c），表明 950 hPa 东风急流的发展主要受纬向气压梯度增强驱动（气压梯度力指向西）。水平平流项次之，为-6×10^{-4} m s^{-2}（图 5a），表明上游较强的东风动量向西输送，促进了广西沿海东风急流发展。垂直输送项影响较小（图 5b），对边界层急流发展的影响有限。科氏力项为 4.5×10^{-4} m s^{-2}（图 5d），对东风增强起抵消作用，这与实际风场中的偏南风分量有关。残差项为 4.5×10^{-4} m s^{-2}（图 5e），也起减弱东风的作用，该项包括摩擦、湍流交换等未显式计算的过程，可能

与来自南海北部的东风急流登陆后下垫面摩擦作用增强有关。

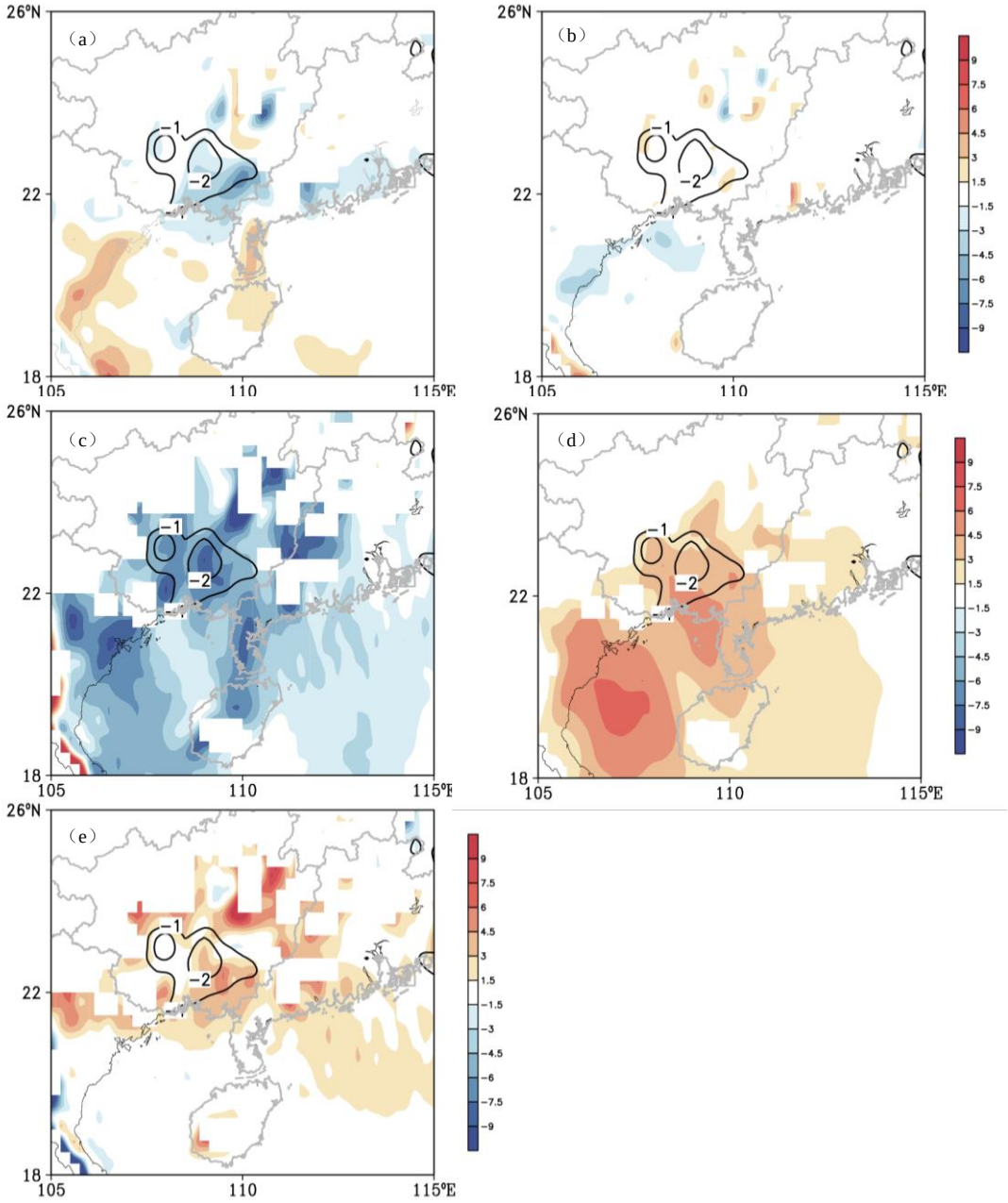


图 5　19 日 02 时前 6h 平均的 950hPa 经向风动量方程各项分布(单位：10^{-4} m s^{-2}；等值线为趋势项，a.水平平流，b.垂直输送，c.气压梯度力，d.科氏力，e.残差)

Fig.5　Distributions of terms for the momentum equation of meridional wind in the 950hPa averaged over the 6 hours prior to 02:00 BT 19 May (unit: 10^{-4} m·s^{-2}, contours denote tendency term, (a) horizontal advection, (b) vertical advection, (c) pressure gradient force, (d) Coriolis force and (e) residual

边界层急流增强主要受气压梯度力增大驱动，因此进一步分析降雨前后 950hPa 位势高度的演变（图 6）。广西沿海边界层急流西侧越南北部有低值系统发展，使沿海气压梯度力增大。叠加的 FY-4A TBB 资料显示，同期越南北部对流云系强烈发展，19 日 03 时对流云团 TBB 低于-70 ℃。越南北部低层位势高度下降与对流云系发展相伴，可能与降雨过程中

的凝结潜热释放有关。随着低值系统增强，49 dagpm 等高线（图中红色线）明显东扩至广西中部（降雨区东界），广西境内等高线增至 3 条，指向西的气压梯度加大，促进东风急流增强。上述演变表明，广西沿海边界层急流的发展与越南北部低值系统增强密切相关。

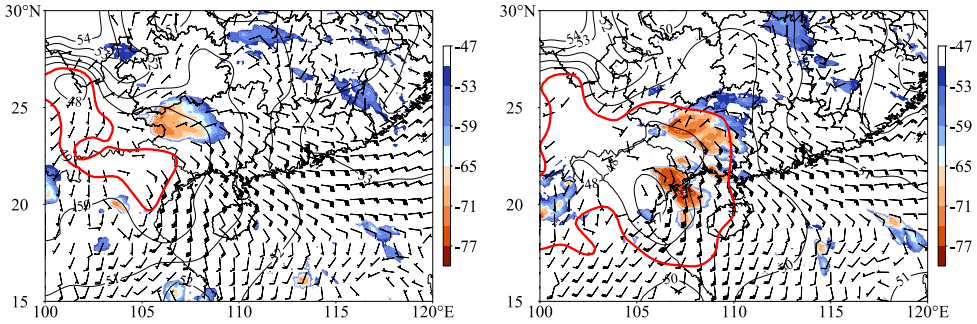


图 6　2024 年 5 月 18 日 23 时（a）和 19 日 03 时（b）950hPa 高度场（等值线,单位:dagpm，红色线为 49dgpm 位势高度）、风场（风向杆）、TBB（填色，单位：℃）

Fig.6　Geopotential height (contours, unit: dagpm; red line indicates 49-dagpm isohypse), wind field (wind barbs) and TBB (shaded, unit: ℃) at 950hPa for (a) 23:00 BT 18 May and (b) 3:00 BT 19 May 2024

4.3 钦州极端小时降雨风暴演变特征

18 日 20:00 起，钦州附近沿海陆续生成多个对流单体，初期回波零散，发展不明显。至 22:30，多个对流单体开始合并增强，形成对流带 A。19 日 00:30，A 内多个单体合并成强对流回波 B，随后向东北方向移动，未影响关键区；其南侧持续生成新的对流单体，如 C、D、E 和 F。1:36，单体 C、D、E 合并形成中 β 尺度雨带 H，雨带宽度明显增加，强度增强，最大反射率因子超过 55 dBz，并开始影响强降雨区。其西侧的对流单体 F、G 也逐渐增强并向西移动。2:06，对流单体 F、G 与雨带 H 相连，使雨带向西扩展，强回波中心开始影响关键区，分钟雨率迅速升至 2 mm min^{-1} 以上。2:36，对流单体 F、G 和雨带 H 完全合并成雨带 I，回波迅速增强，45 dBz 以上的回波面积明显扩大，形成椭圆形块状多单体风暴。此时最大反射率因子超过 60 dBz，回波结构密实，关键区分钟雨率升至 4 mm min^{-1} 以上。风暴在钦州沿岸稳定维持，造成 204 mm h^{-1} 的极端小时降雨。

从风暴结构看，2:02（图 8a1），对流单体 G 与雨带 H 开始合并，形成西南—东北走向、近椭圆形的多单体风暴。垂直剖面显示（图 8a2），回波自低层向高层由西向东倾斜，强回波东侧存在弱回波区，回波质心位于约 3 km 高度，具有低质心暖云降雨回波特征，此类对流系统具有极高的降雨效率（Huang et al, 2019）。2:56，风暴进一步增强（图 8b），55 dBz 回波顶高达 6.5 km，表明风暴内上升气流进一步增强。风暴南侧出现有界弱回波区和悬垂回波，强反射率因子核心位于有界弱回波区上方，反射率因子高梯度区向低层暖湿气流入流一侧倾斜。有界弱回波区通常与风暴中的中气旋有关（龚佃利等, 2021）。

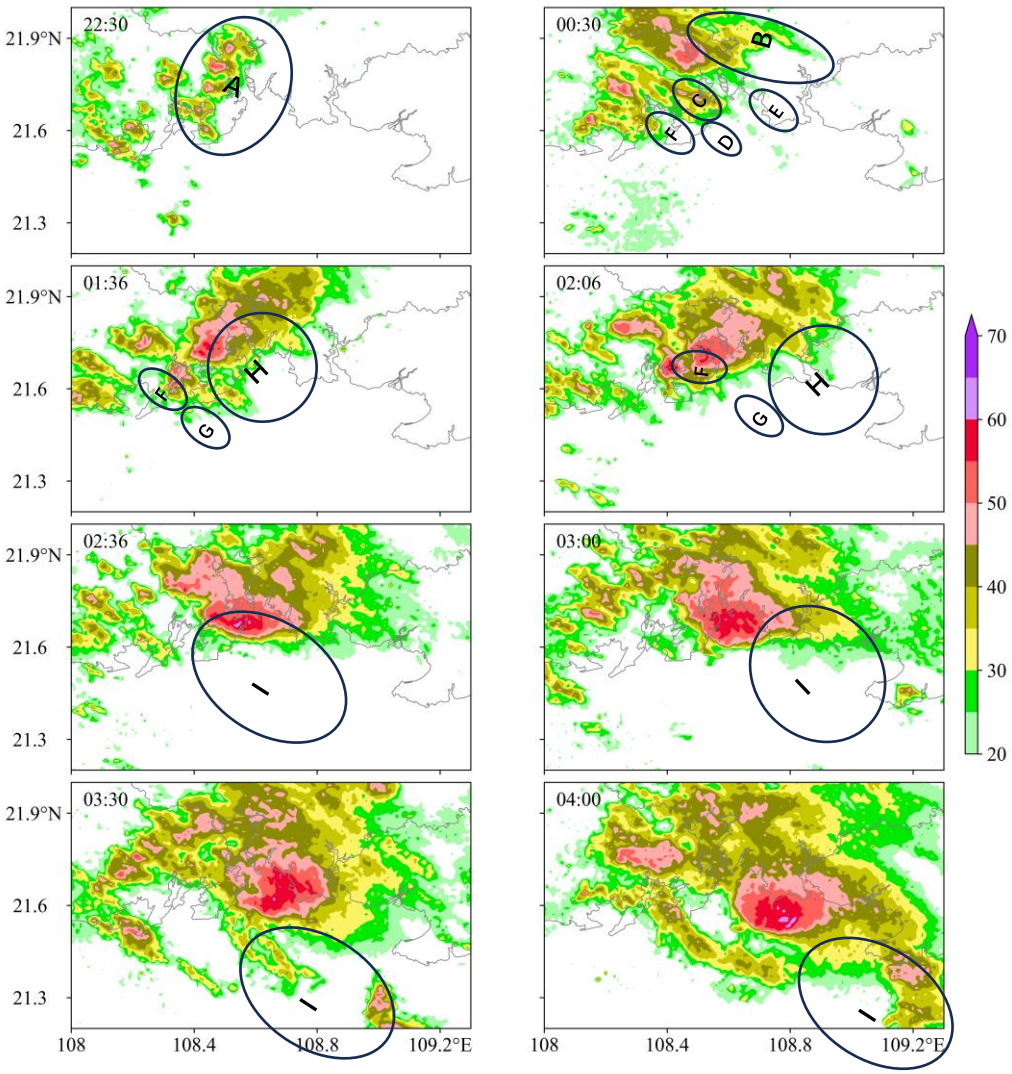


图 7　2024 年 5 月 18 日 22:30—19 日 04:00 雷达组合反射率因子演变

Fig.7　Evolution of radar composite reflectivity from 22:30 BT 18 May to 4:00 BT 19 May 2024

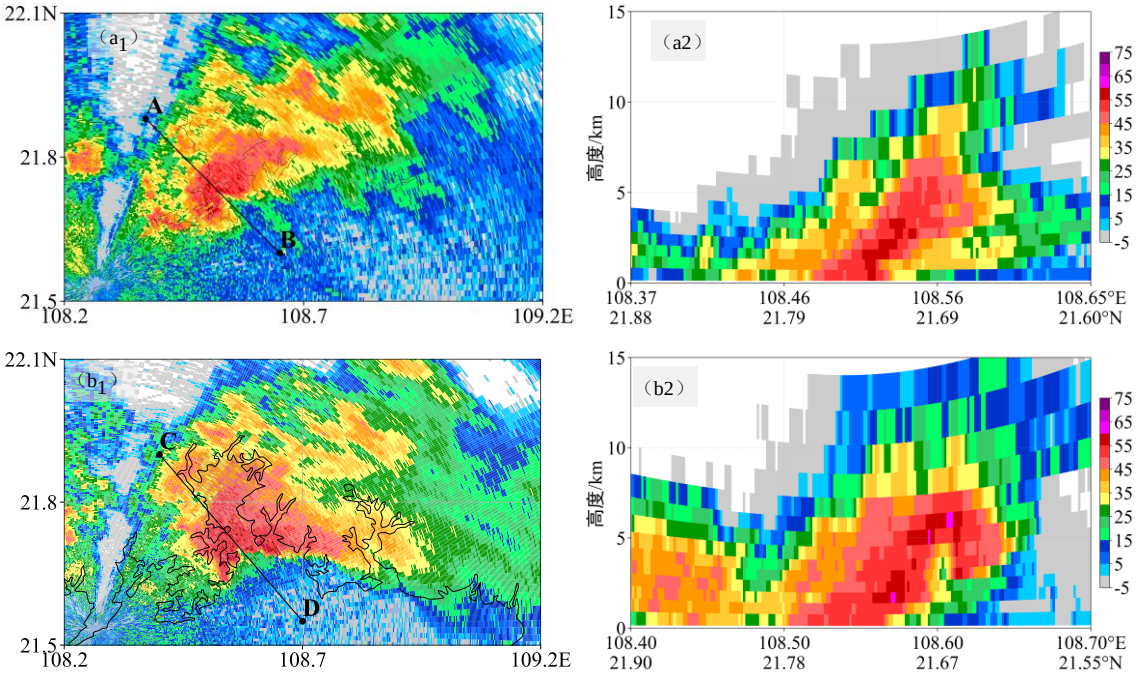


图 8　2024 年 5 月 19 日（a1、b1）防城港雷达 0.5° 仰角反射率因子（单位：dBz）和（a2、b2）沿着对应时刻反射率因子图上黑色直线的垂直剖面（a1、a2，2:02；b1、b2，02:56）

Fig.8　(a1, b1) Reflectivity factors at 0.5 °elevation(unit: dBz) and (a2, b2) vertical cross sections of reflectivity along the black lines shown in the corresponding reflectivity panels from the Fangchenggang radar at (a1, a2) 02:02 and (b1, b2) 02:56 BT on 19 May 2024

4.4　对流组织化加强的原因

初始对流向在东北移动过程中不断合并增强，1:30 后对流迅速组织化发展。钦州龙门港站分钟雨率随之增大，2:00 后超过 2 mm min^{-1}，2:35 后超过 4 mm min^{-1}。以下结合雷达径向速度和地面自动站资料，分析对流快速增强的原因。

雷达径向速度显示，2:07，0.5 °和 1.5 °仰角上出现弱中 γ 尺度涡旋（图 9a2）。随后，风暴前侧入流增强，反射率因子图上出现明显的弱回波区和入流缺口，对应的速度图上中 γ 尺度涡旋的强度明显增强。2:47，涡旋旋转速度达 12 m s^{-1}，3:10 增至 20 m·s^{-1}，达到最强。涡旋位于风暴前侧，与上升气流位置基本重合。19 日 02 时后，低空东南急流迅速增强，1 km 高度的径向速度达到 20 m s^{-1} 左右，为低层风切变及旋转发展提供了有利条件。

图 10 显示，中 γ 尺度涡旋切变强度达到峰值前，涡旋中心附近的炮台角和龙门港站 5 min 雨量逐渐增加。2:49，龙门港站 5 min 雨量达到峰值 21.8 mm，随后涡旋切变快速增强，至 3:10，涡旋切变强度达到 19×10^{-3} s^{-1}。同时，40 dBz 回波最大高度（maxHt_40dBz）也显著升高，3:10 后超过 13 km。Zipser et al（2006）指出，maxHt_40dBz 可用作深对流中强上升气流的代表。本次过程中，涡旋切变增强与 maxHt_40dBz 增大基本同步，说明涡旋的增强有利于上升运动的发展。降雨达到峰值后涡旋继续增强，可能与凝结潜热释放增强上升运动及涡度拉伸作用有关，类似于广州的“5 月 7 日”极端降雨事件中的反馈过程（Li et al, 2021）。涡旋增强后，站点雨量迅速减小，并不意味着涡旋增强导致降雨减弱。从雷达回波

上来看，此时的对流仍是增强的（图 7），最强反射率因子达 65dBz，但对流单体主体已南移至北部湾海面，对上述站点影响减小，因而站点观测雨量下降。

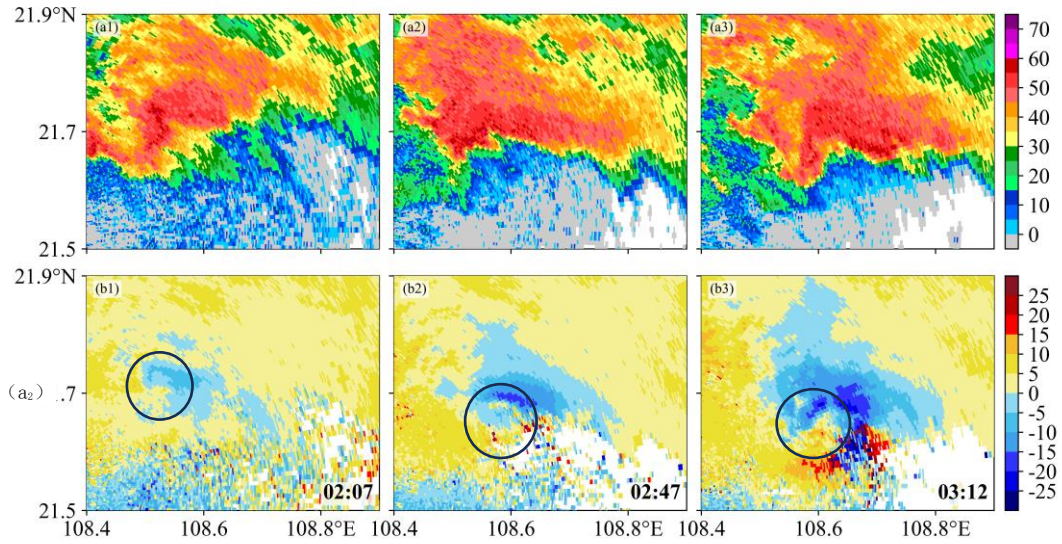


图 9　2024 年 5 月 19 日 2:07、2:47 和 3:12 防城港雷达 1.5° 仰角反射率因子（a1—a3，单位：dBz）和径向速度（b1—b3，单位：m s^{-1}）

Fig.9　Reflectivity factor (a1—a3,unit:dBz) and radial velocity (b1—b3,unit:m s^{-1}) at the 1.5° elevation angle from the Fangchenggang radar at 02:07, 02:47, and 03:12 BT on 19 May 2024

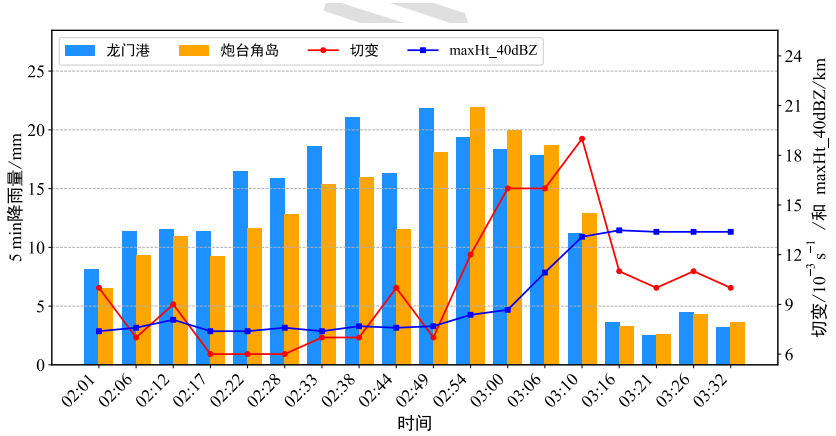


图 10　2024 年 5 月 19 日 2:01—3:32 期间炮台角站和龙门港站逐 5 分钟雨量（柱状）和对应的降水系统切变（红色实线）和 40 dBz 回波最大高度（蓝色实线）

Fig.10　5-minute rainfall (bars) at Longmengang Station and Paotaijiao Station, corresponding precipitation system shear (red solid line), and maximum height of 40 dBz echo (blue solid line) observed from 02:01 to 03:32 BT on 19 May 2024

地面加密自动气象站相当位温与风场分布（图 11）显示，来自海上的东南和偏南暖湿气流伸向内陆，其对应的相当位温超过 360 K（图 11a）。其北侧为相对干冷的气团，两者在降雨区附近形成相当位温梯度大值区，表现为中尺度锋区，早期对流主要在该中尺度锋区附近触发，并沿着锋面向东北方向移动。19 日 02:00 后，强降雨区（图 11 中红色+号）北侧

冷气团与降雨冷池的合并作用，使得中尺度锋面增强，并转为东西向，冷池产生的偏北出流增强（图 11b 中蓝色箭头），锋面南侧东南气流也明显加强，3:00 最大风速达到 22 m s^{-1}，东南暖湿气流与冷池偏北出流在强降雨区附近交汇，形成较强辐合，对流在此维持；中尺度涡旋位于暖湿舌和冷池出流的交界位置，降雨冷池增强并向南扩展，其前沿的相当位温梯度增大，中尺度锋面向暖区弯曲（图 11c）。4:00，降雨形成的冷池进一步增强（图 11d），并快速向南移动，对流主体也随之南移，钦州强降雨区的降雨开始减弱。

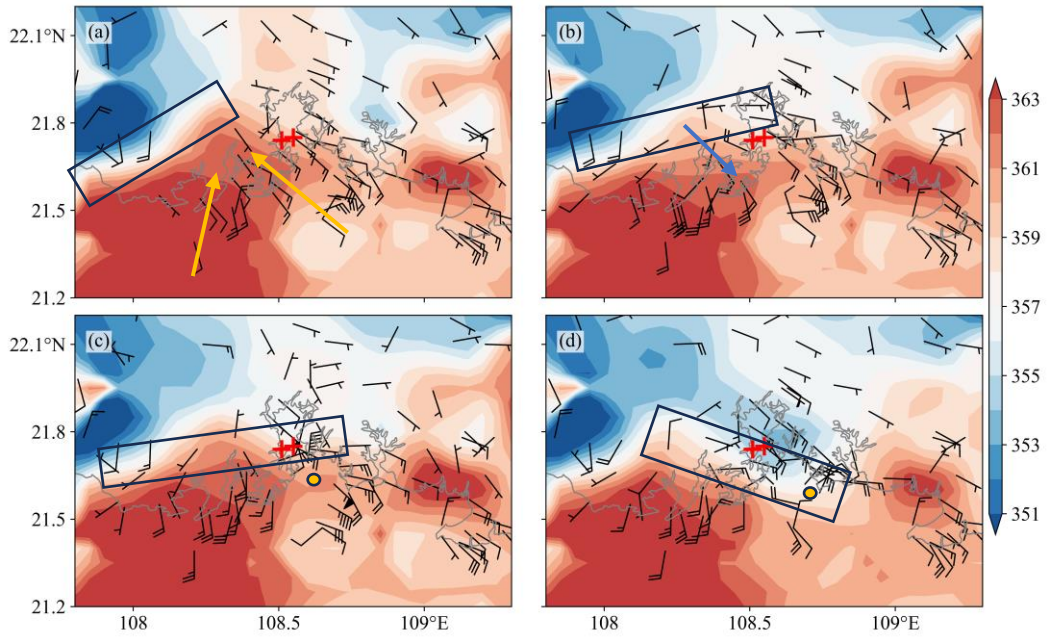


图 11　2024 年 5 月 18 日 22:00（a）、19 日 2:00（b）、3:00（c）、4:00（d）地面相当位温（填色，单位：K）及风场（风羽）分布（+代表强降水中心，黄色圆点代表中γ尺度涡旋位置，黑色框代表相当位温梯度大值区）

Fig.11　Distribution of surface equivalent potential temperature derived from dense automatic weather stations (shaded,units:K) and wind field (wind barbs) at (a) 22:00 BT 18 May 2024, (b) 2:00 BT 19 May 2024, (c) 3:00 BT 19 May 2024, and (d) 4:00 BT 19 May 2024. The "+" symbols denote the centers of heavy precipitation, yellow dots indicate the locations of meso-γ-scale vortices, and the black boxes highlight regions with high equivalent potential temperature gradients

5　结论与讨论

本文利用多源观测资料和再分析数据，对 2024 年 5 月 19 日发生在广西钦州的暖区极端暴雨过程进行了系统分析。研究表明，此次极端降雨是在有利的大尺度环流配置、异常强的低层水汽输送以及中尺度对流系统组织化发展共同作用下形成的，主要结论如下：

（1）此次钦州暴雨过程的小时降雨量突破广西历史极值，具有显著的极端性。

（2）广西位于 200 hPa 南亚高压东侧的分流辐散区，受 500 hPa 短波槽东移及 850 hPa

低涡活动影响。强降雨区位于 950 hPa 东南边界层急流顶部的暖湿气流辐合区内，低层辐合及上升运动与降雨中心对应较好。降雨前湿层深厚、暖云层厚度大，配合充足的水汽和不稳定条件，为强降雨提供了有利的环境条件。

（3）低层东南急流水汽输送显著偏强，水汽通量距平达到 3 倍标准差，为沿海强降雨提供了充沛水汽。纬向动量收支表明，指向西的气压梯度力增强是边界层偏东急流加强的主要原因，而越南北部的降雨云系导致的低压系统发展可能是其主要原因。

（4）对流在地面中尺度锋区附近不断生成、合并，逐渐发展为组织化的多单体风暴。增强的东南暖湿气流与冷池偏北出流在强降雨区附近交汇，对流持续维持。风暴前侧出现中 γ 尺度涡旋，其旋转速度和切变强度持续增大，并伴随强回波向高层伸展。站点降雨峰值早于涡旋切变峰值。

本次极端降雨过程表明，边界层急流增强、冷池出流与暖湿入流交汇及对流持续合并，是沿海极端强降雨监测中值得关注的信号。中尺度涡旋增强伴随强回波向高层伸展，与强降雨形成正反馈机制。但受限于现有诊断方法，尚难以定量分离潜热释放、冷池结构与水汽输送等因素在中尺度涡旋演变和极端强降雨形成中的相对贡献。后续可结合高分辨率数值模拟以及更精细的观测资料，进一步研究。

参考文献

蔡景就, 伍志方, 陈晓庆, 等, 2019. “18·8”广东季风低压持续性特大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 38(6): 576-586. Cai J J, Wu Z F, Chen X Q, et al, 2019. Cause analysis of persistent torrential rain associated with monsoon depression occurred in Guangdong on August 2018[J]. Torr Rain Dis, 38(6): 576-586 (in Chinese).

陈芳丽, 姜帅, 李明华, 等, 2021. 边界层急流在粤东暴雨中心两次极端强降水过程中的作用[J]. 气象, 47(3): 290-302. Chen F L, Jiang S, Li M H, et al, 2021. The role of boundary layer jet in two severe rainfalls over eastern region of Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 47(3): 290-302 (in Chinese).

陈红专, 2021. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象, 47(10): 1219-1232. Chen H Z, 2021. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 47(10): 1219-1232 (in Chinese).

陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等, 2012. 2000—2009 年 5、6 月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报, 28(5): 707-718. Chen X X, Ding Z Y, Liu C H, et al, 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000—2009[J]. J Trop Meteor, 28(5): 707-718 (in Chinese).

丁治英, 刘彩虹, 沈新勇, 2011. 2005—2008 年 5、6 月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 27(3): 307-316. Ding Z Y, Liu C H, Shen X Y, 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall, upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008[J]. J Trop Meteor, 27(3): 307-316 (in Chinese).

龚佃利, 王洪, 许焕斌, 等, 2021. 2019 年 8 月 16 日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J]. 气象学报, 79(4): 674-688. Gong D L, Wang H, Xu H B, et al, 2021. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong province[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 674-688 (in Chinese).

官晓军, 范能柱, 李婷婷, 等, 2025. 孟加拉湾风暴对华南前汛期持续性极端降水过程的水汽输送机制研究[J]. 气象学报, 83(1):

46-60. Guan X J, Fan N Z, Li T T, et al, 2025. Mechanism for transport of water vapor by Bay of Bengal storms to pre-flood season persistent extreme rainfall in South China[J]. Acta Meteor Sin, 83(1): 46-60 (in Chinese).

何立富, 陈涛, 孔期, 2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 559-569 (in Chinese).

林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等, 2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社: 135-138. Lin L X, Feng Y R, Huang Z, et al, 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 135-138 (in Chinese).

刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发, 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J]. 大气科学, 43(1): 119-130. Liu R X, Sun J H, Chen B F, 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Chin J Atmos Sci, 43(1): 119-130 (in Chinese).

沈晓玲, 冯博, 李锋, 等, 2024. 一次弱天气背景下浙江局地暖区暴雨成因分析[J]. 气象, 50(2): 170-180. Shen X L, Feng B, Li F, et al, 2024. Cause analysis of rainstorm in local warm sector under a weak weather background in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 50(2): 170-180 (in Chinese).

孙继松, 雷蕾, 于波, 等, 2015. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 73(4): 609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 73(4): 609-623 (in Chinese).

肖红茹, 周春花, 龙柯吉, 等, 2025. 四川盆地两次持续性极端暴雨对比分析[J]. 气象, 51(3): 269-284. Xiao H R, Zhou C H, Long K J, et al, 2025. Comparative analyses of two persistent extreme rainstorms in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 51(3): 269-284 (in Chinese).

杨磊, 郑永光, 袁子鹏, 等, 2023. 2019 年 8 月 16 日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J]. 气象学报, 81(1): 19-39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al, 2023. The low-level meso-γ-scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: formation, merging, and rain-producing mechanisms[J]. Acta Meteor Sin, 81(1): 19-39 (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).

曾智琳, 谌芸, 朱克云, 2019. 2017 年 6 月一次华南沿海强降水的对流性特征及热动力机制研究[J]. 大气科学, 43(6): 1295-1312. Zeng Z L, Chen Y, Zhu K Y, 2019. Convective characteristics and thermal dynamic mechanisms for coastal torrential rainfall over South China during June 2017[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6): 1295-1312 (in Chinese).

周佰铨, 翟盘茂, 2023. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. 气象, 49(3): 257-266. Zhou B Q, Zhai P M, 2023. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses[J]. Meteor Mon, 49(3): 257-266 (in Chinese).

Du Y, Zhang Q H, Chen Y L, et al, 2014. Numerical simulations of spatial distributions and diurnal variations of low-level jets in China during early summer[J]. J Climate, 27(15): 5747-5767.

Hart R E, Grumm R H, 2001. Using normalized climatological anomalies to rank synoptic-scale events objectively[J]. Mon Wea Rev, 129(9): 2426-2442.

Huang Y J, Liu Y B, Liu Y W, et al, 2019. Budget analyses of a record-breaking rainfall event in the coastal metropolitan city of Guangzhou, China[J]. J Geophys Res: Atmos, 124(16): 9391-9406.

IPCC, 2023. Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

Jiang Z N, Zhang D L, Xia R D, et al, 2017. Diurnal variations of presummer rainfall over southern China[J]. J Climate, 30(2): 755-773.

Kong H, Zhang Q H, Du Y, et al, 2020. Characteristics of coastal low-level jets over Beibu Gulf, China, during the early warm season[J]. J Geophys Res: Atmos, 125(14): e2019JD031918.

Li M X, Luo Y L, Zhang D L, et al, 2021. Analysis of a record-breaking rainfall event associated with a monsoon coastal megacity of South China using multisource data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 59(8): 6404-6414.

Liu G, Wu R G, Sun S Q, et al, 2015. Synergistic contribution of precipitation anomalies over northwestern India and the South China Sea to high temperature over the Yangtze River valley[J]. Adv Atmos Sci, 32(9): 1255-1265.

Liu X, Luo Y L, Guan Z Y, et al, 2018. An extreme rainfall event in coastal South China during SCMREX-2014: formation and roles of rainband and echo trainings[J]. J Geophys Res: Atmos, 123(17): 9256-9278.

Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al, 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River Basin[J]. J Climate, 26(1): 110-132.

Xu W X, Zipser E J, Chen Y L, et al, 2012. An orography-associated extreme rainfall event during TiMREX: initiation, storm evolution, and maintenance[J]. Mon Wea Rev, 140(8): 2555-2574.

Zeng Z L, Wang D H, 2022. On the local rain-rate extreme associated with a mesovortex over South China: observational structures, characteristics, and evolution[J]. Mon Wea Rev, 150(5): 1075-1096.

Zhang Q Y, Luo Y L, Tang Y, et al, 2022. Cause-effect relationship between meso-γ-scale rotation and extreme short-term precipitation: observational analyses at minute and sub-kilometer scales[J]. J Meteor Res, 36(4): 539-552.

Zipser E J, Cecil D J, Liu C T, et al, 2006. Where are the most intense thunderstorms on Earth?[J]. Bull Am Meteor Soc, 87(8): 1057-1072.

《气象》待刊