覃皓,刘乐,农孟松,等.2023.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 Hao, LIU Le, NONG Mengsong, et al. 2023. The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):640-647 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-097

广西一次持续性暴雨过程中低空急流的作用及其特征

覃皓,刘乐,农孟松,黄伊曼,屈梅芳
(广西壮族自治区气象台,南宁 530022)

摘　要: 2022年广西遭遇新中国成立以来最强"龙舟水",其中6月17—22日的持续性暴雨过程累积雨量大、落区重叠,导致洪涝、山洪及滑坡等灾害。利用多源观测资料及欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料,分析了此次持续性暴雨过程中低空急流的影响及其特征,结果表明:(1) 夜间低空急流明显增强,对流系统在急流核北侧发展,而日间随着低空急流减弱,对流系统也逐渐减弱,造成强降水主要集中于夜间。(2) 夜间850 hPa低空急流左侧正涡度区与925 hPa边界层急流出口区在桂东北一带重合,配合桂北山脉地形阻挡形成深厚的低层辐合,有利于桂东北上升运动增强及对流系统不断发生发展。同时,大气低层对流不稳定迅速增大,为持续性暴雨提供了有利的不稳定层结环境。(3) 低空急流的演变可用惯性振荡机制来解释。日间桂中至桂南地区地表被加热导致湍流摩擦逐渐增强,造成急流减速,具有次地转特征。夜间湍流摩擦作用减弱,急流加速并逐渐呈现出超地转特征。科氏力对非地转风的作用是造成急流动量增长的主要原因,而摩擦耗散、垂直输送等过程为急流动量汇。

关键词: 持续性暴雨;低空急流;惯性振荡;非地转风
中图法分类号: P432^{+1}.1　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-097

The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi

QIN Hao, LIU Le, NONG Mengsong, HUANG Yiman, QU Meifang

(*Guangxi Meteorological Observatory,Nanning* 530022)

Abstract: In 2022, Guangxi experienced the strongest Dragon Boat Precipitation since the founding of the People's Republic of China. The persistent rainstorm process from 17 June to 22 June 2022 had large accumulations and overlapping falling areas, leading to floods, torrential floods, landslides, and other disasters. The impacts of the low-level jet and its characteristics during this process were analyzed based on multi-source observation data and ERA5 reanalysis data. The results show that: (1) The low-level jet enhanced significantly during the night, and the convective system developed on the north side of the jet core. During the daytime, the low-level jet weakened and the convective system gradually disappeared, resulting in the heavy precipitation being mainly concentrated during the night. (2) During the night, the positive vorticity zone on the left of the 850 hPa low-level jet coincided with the exit zone of the 925 hPa boundary-level jet in the northeast of Guangxi, which combined with the mountain terrain barrier, and caused deep low-level convergence. The low-level convergence was conducive to the enhancement of the upward movement in northeast Guangxi and favored the continuous development of the convective system. At the same time, the convective instability in the lower atmosphere also increased rapidly, which provided a favorable unstable stratification environment for heavy precipitation. (3) The variation of the low-level jet can be well explained by the inertial oscillation mechanism. During the day, the surface heating in the central and southern regions of Guangxi led to the gradual enhancement of turbulent friction, resulting in jet deceleration with the characteristics of sub-geostrophic. During the night, the turbulent friction was weakened, and the jet accelerated, which gradually presented the characteristics of super-geostrophic. The Coriolis force acting on ageostrophic wind was the main contributor to the momentum of the jet, while friction dissipation and vertical transport were the momentum sinks.

Key words: persistent rainstorm; low-level jet; inertial oscillation; ageostrophic wind

收稿日期: 2023-05-08;**定稿日期:** 2023-12-19
资助项目: 广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026340,2022GXNSFBA035565);广西气象科研计划项目(桂气科2021Z03)
第一作者: 覃皓,主要从事灾害性天气诊断及预报研究。E-mail:289055112@qq.com
通信作者: 农孟松,主要从事灾害性天气预报和研究工作。E-mail: nmsong1997@163.com

引　言

广西位于我国华南沿海，前汛期(4—6月)暴雨频发、灾害频出。由于前汛期正值端午龙舟竞渡，此期间出现的强降水亦称“龙舟水”。多年来，不少学者对前汛期暴雨机理展开了一系列研究，认为低空急流的热动力作用非常重要，包括其作为水汽输送通道提供大量不稳定暖湿空气、急流出口区的辐合抬升以及与地形的相互作用等(何立富等，2016；董良淼等，2021)。随着研究深入，学者将低空急流进一步划分为高度位于1～4 km之间的与天气系统相关的天气尺度低空急流以及1 km以下的边界层急流(Du et al.，2014；Du and Chen，2019)。叶朗明和苗峻峰(2014)研究指出，夜间边界层急流增强带来强暖湿输送，受地形强迫抬升有利于触发中尺度对流系统启动暴雨。曾智琳等(2019)认为夜间西南风急流的建立有利于边界层垂直风切变增强，促进水平涡度向垂直涡度转换，进而与风速水平切变造成的垂直涡度叠加，造成华南沿海强降水长时间维持。智协飞等(2022)通过对华南地区急流事件进行客观筛选，发现广西中北部夜间降水与天气尺度低空急流发展的关系更为密切，降水落区主要位于急流左前方山区。除此之外，边界层急流低层辐合与天气尺度低空急流入口区中低层辐散的耦合机制被认为是华南沿海暖区暴雨的重要触发机制之一(Du and Chen，2019)。可见，两类低空急流对华南暴雨分布具有不同影响，其影响机理与地形作用、天气扰动和水汽输送过程密切相关，但共同点是两者均在暴雨发生发展过程中扮演了重要角色。

关于低空急流的形成与增强，目前主要通过惯性振荡理论(Blackadar，1957)和倾斜地形的斜压理论(Holton，1967)来解释，前者强调了边界层的湍流混合作用而后者主要考虑了倾斜地形造成的热力差异。王东阡和张耀存(2012)通过2000—2009年期间共10 a的再分析资料探讨了中国东部西南低空急流的日变化规律，认为西太平洋副热带高压(以下简称副高)强度和位置的变化、青藏高原大地形加热效应和昼夜海陆热力性质差异是造成经向非地转风夜间加强的重要原因。Kong等(2020)基于WRF模式研究发现，由于中南半岛湍流混合强烈，安南山脉上游风在白天较弱，无法通过山脉；在日落后，由于湍流混合减弱，气流风速迅速增大并越过安南山脉，通过平流作用向下游传播，使得北部湾西部在暖季夜间盛行西南低空急流。Dong等(2021)也认为惯性振荡机制对于夜间北部湾西部低空急流的形成具有显著贡献，而急流的水汽输送及动力抬升作用是导致两广(即广西壮族自治区和广东省)夜间降水峰值的重要原因。

综上，目前已有研究对华南低空急流的影响及成因进行了探讨，但多集中于两广沿海以及北部湾一带，而对于两广内陆地区的关注相对较少，其中的热动力机制值得研究。2022年广西遭遇新中国成立以来最强“龙舟水”(黄雪松等，2023)，其中6月17—22日的持续性暴雨过程属当年“龙舟水”期间最强(刘国忠等，2023)。持续性强降水导致全区9市多个县区出现洪涝、山洪及滑坡等灾害，湘江、桂江、西江等多条河流水位超警。本文选取此次过程，探讨其中低空急流的配置及其对暴雨的影响，并分析其演变的机制，以期为预报提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

使用资料包括：(1) 常规气象观测资料(包括广西全区89个国家站，2 821个区域站的降水数据)，风云2G卫星的相当黑体温度(Top Blackbody Brightness temperature，TBB)资料(分辨率0.1°×0.1°)。(2) 欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据(ERA5，从https://cds.climate.copernicus.eu获取)，ERA5水平分辨率为0.25°×0.25°，时间分辨率为1 h，变量包括位势高度、温度、比湿、水平风场、边界层高度以及地表净辐射等(Hersbach et al.，2020)，其中温度、比湿用于计算假相当位温(θ_{se})。文中时间均为北京时。

1.2 急流的定义

基于ERA5风场资料，将600~900 hPa上风速超过12 m·s^{-1}视为出现低空急流，将900 hPa高度以下风速超过12 m·s^{-1}视为出现边界层急流(赵强等，2017；李青春等，2022)。

1.3 水平动量收支诊断

为定量分析各因素对低空急流变化的影响，利用水平动量收支方程(Du et al.，2014)进行诊断，计算公式为

$$\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t}=-\boldsymbol{V}_h\cdot\nabla_h\boldsymbol{V}-f\boldsymbol{k}\times\boldsymbol{V}_a+\boldsymbol{F}_r \tag{1}$$

其中，方程左侧项为风速变化趋势项(简称趋势项)，右边第1～3项分别为水平平流项(简称平流项)、作用于非地转风的科氏力项(简称科氏力项)以及残差项。残差项包含摩擦、垂直输送以及其余影响。由于低空急流方向并不与x或y轴平行，需将水平动量收支方程应用于转化后的右手坐标系(x',y')，这里y'指向低空急流方向。基于上述变换得到

$$v'=u\sin\varphi+v\cos\varphi \tag{2}$$

其中，v'为y'方向风速，即急流强度，φ为y'与y轴夹角。因此方程(1)中的趋势项(f_1)、平流项(f_2)、科氏力项

(f_3)以及残差项(f_4)分别为

$$f_1=\frac{\partial u}{\partial t}\sin\varphi+\frac{\partial v}{\partial t}\cos\varphi \tag{3}$$

$$f_2=\left(-u\frac{\partial u}{\partial x}-v\frac{\partial u}{\partial y}\right)\sin\varphi+\left(-u\frac{\partial v}{\partial x}-v\frac{\partial v}{\partial y}\right)\cos\varphi \tag{4}$$

$$f_3=f\left(v-v_g\right)\sin\varphi-f\left(u-u_g\right)\cos\varphi \tag{5}$$

$$f_4=F_x\sin\varphi+F_y\cos\varphi \tag{6}$$

2 降水实况与环流背景

2.1 降水实况

2022年6月17—22日广西遭遇了一次持续性暴雨过程，过程累积雨量大、降水落区在桂东北一带重叠(图1a)，17日08:00—22日08:00累计雨量最大达907.3 mm，出现在临桂宛田十二滩漂流景区站(简称景区站)。过程以暖区暴雨为主，并且具有明显的对流性质，共8个区域自动站观测到100 mm以上的极端小时雨量，景区站最大小时雨量达110.3 mm(图1b)。选取累计雨量大于600 mm的9个站点(景区站，临桂宛田站，灵川九屋站，灵川兰田站，兴安华江水厂站，融水香粉站，兴安华江斧子口水库站，兴安溶江司门站，灵川三街小溶江水库站)作为代表站，由各代表站中的最大小时雨量时间序列可见，该过程降水强

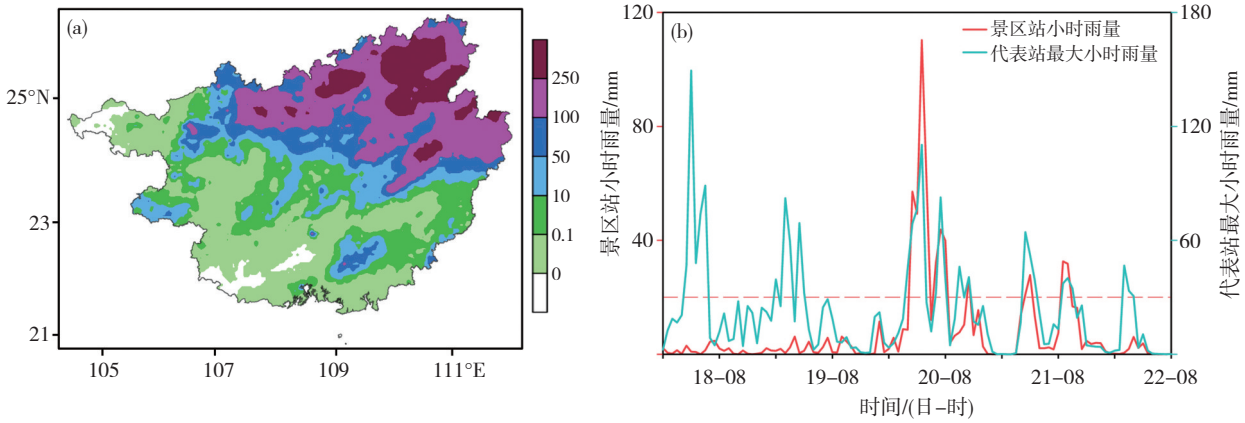

图1 2022年6月17日08:00—6月22日08:00广西累积雨量(a,单位: mm)的空间分布以及代表站逐小时雨量变化(b,单位: mm)

Fig.1 (a) Spatial distribution of accumulated rainfall from 08:00 BT on 17 June to 08:00 BT on 22 June 2022 (unit: mm) and (b) hourly rainfall of representative stations (unit: mm)

度夜间明显强于白天，降水基本在20:00左右开始逐渐增强。

2.2 环流背景

2022年6月17—22日过程期间，200 hPa上南亚高压控制青藏高原南侧，东伸脊点位于115°E附近，广西北部位于南亚高压东侧扇形分流区，维持有利降水的高层辐散形势。500 hPa上，广西处于586 dagpm线西北侧，副高脊线位于20°N以南，西脊点位于120°E附近。高原东南侧110°E附近有低槽维持，广西位于槽底(图2a)。副高较常年平均偏南、偏西，这一方面有利于其西北侧的西南风向广西输送水汽，另一方面有利于阻挡上游低值系统东移。过程期间低槽稳定少动，与副高形成“西低东高”的对峙形势，为此次过程提供有利的天气尺度抬升背景。

低层850 hPa上云贵高原东侧有低涡发展，广西位于低涡暖式切变南侧的偏南风暖区中。广西上空等高线密集，西南风强盛，过程期间平均风速12～16 m·s^{-1}，有利于暖湿气流输送，为强降水发展提供充足水汽(图2b)。边界层925 hPa广西受偏南风控制，风速自南向北减小，在桂东北一带为风速辐合，有利于对流触发。地面形势上广西位于西南暖低压底前部均压场中，无明显冷空气影响(图略)。

3 低空急流对暴雨的影响

由强降水落区108°—112°E平均的850 hPa风速及风场的时间–纬度剖面(图2c)可见，6月17—22日强降水区域均维持较强的西南低空急流，风速超过12 m·s^{-1}。夜间西南急流存在明显增强，中心强度达到18 m·s^{-1}。由TBB演变可以看到，夜间在急流核北侧不断有对流系统发生发展，TBB达到–52 ℃以下，对应于该时段降水增强(图1b)。日间随着急流减弱对流系统也逐渐消亡，TBB增大，表明过程中急流变化与强对流系统发生发展密切相关。类似地，925 hPa的边界层急流也存在明显的日变化特征，但可能由于地形影响，日变化特征主要出现在23°N以南的低海拔平坦地区及海区(图2d)，该区域边界层急流日变化常与华南沿岸夜间暖区暴雨相联系(Du and Chen, 2019)。该层次以偏南风为主，急流强度较850 hPa弱并且位置偏南，急流出口区的辐合为对流发展提供了一定条件。

3.1 对动力辐合抬升的影响

在急流位置的匹配关系上(以降水较强时段19—

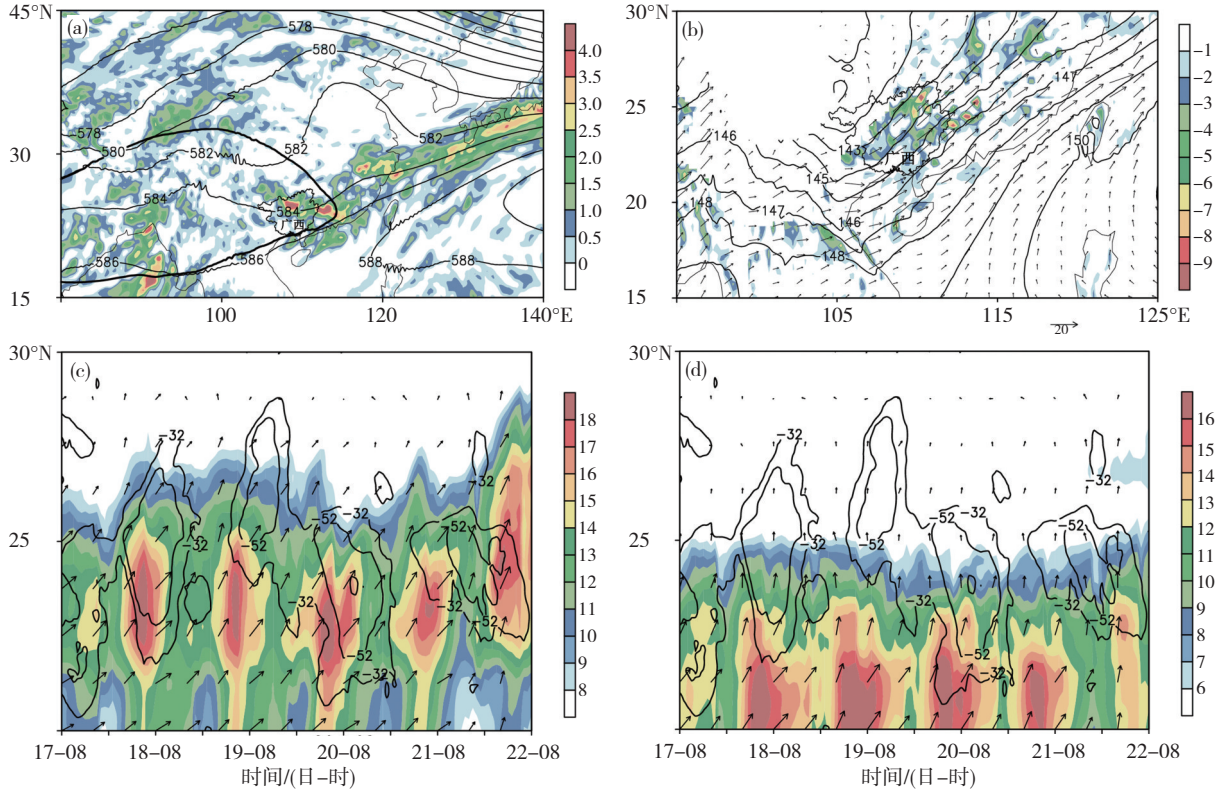

图2　2022年6月17日08:00—22日08:00平均的200 hPa散度(填色,单位:10^{-5} s^{-1};粗实线为200 hPa的1 250 dagpm等值线)和500 hPa高度场(等值线,单位: dagpm)(a), 850 hPa高度场(等值线,单位: dagpm)、风场(矢量,单位: m·s^{-1})和925 hPa散度(填色,单位:10^{-5} s^{-1})(b), 108°—112°E平均的850 hPa (c)、925 hPa (d)风速(填色,单位: m·s^{-1})、风场(矢量,单位: m·s^{-1})和TBB(等值线表示TBB小于等于32℃)的纬度–时间剖面

Fig.2　Distribution of (a) divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}, thick solid line indicate 1 250 dagpm at 200 hPa) at 200 hPa and geopotential height (contour, unit: dagpm) at 500 hPa, (b) geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind (vector, unit: m·s^{-1}) at 850 hPa, divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 925 hPa averaged from 08:00 BT on 17 June to 08:00 BT on 22 June 2022, time–latitude cross sections of wind speed (shaded, unit: m·s^{-1}), wind field (vector, unit: m·s^{-1}) and TBB (contour indicates TBB ≤–32℃) at (c) 850 hPa and at (d) 925 hPa, averaged during 108°–112°E

20日为例),850 hPa急流轴位于桂东,夜间急流轴强度超过16 m·s^{-1},其左侧桂东北一带为强气旋式水平风切变的正涡度区,有利于上升运动发展(图3a)。925 hPa急流轴位于桂南沿海一带,桂东北为急流出口区(图3b)。925 hPa急流出口区与850 hPa急流左侧正涡度区相重合,这种较为深厚的低层辐合配置有利于桂东北一带出现明显的上升运动。上述850 hPa与925 hPa急流相耦合的错位分布配置与Du和Chen(2019)提出的华南沿海地区双低空急流相互作用机制有所不同(即边界层急流出口区辐合与天气尺度急流入口区辐散耦

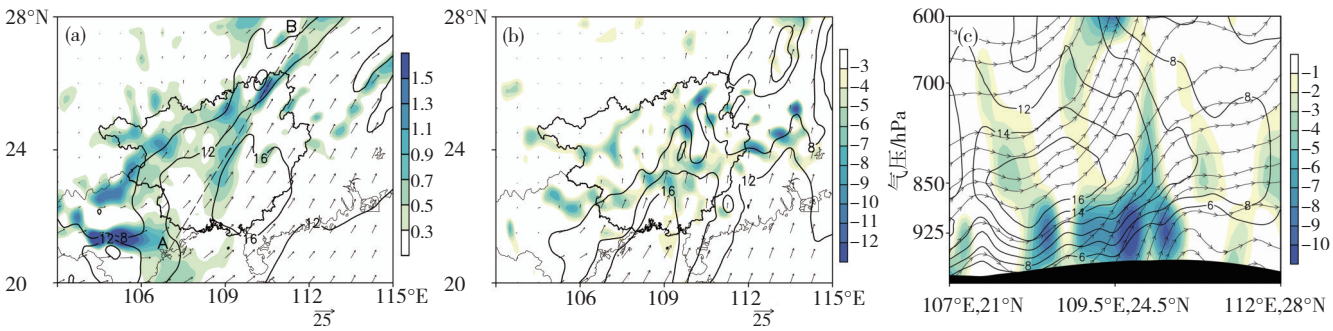

图3　2022年6月19日20:00—20日08:00平均的850 hPa垂直涡度(填色,单位: 10^{-4} s^{-1}),风速(等值线表示大于等于8 m·s^{-1},下同)及环流分布(a),925 hPa水平散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1}),风速(等值线,≥8 m·s^{-1})及环流分布(b), 20日03:00沿图3a中AB虚线上的水平散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})、风速(等值线,单位: m·s^{-1})以及环流的垂直剖面(c)

Fig.3 Distribution of (a) vertical vorticity (shaded, unit: 10^{-4} s^{-1}), wind (contour, ≥8 m·s^{-11}) and circulation distribution at 850 hPa, (b) horizontal divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}), wind (contour indicates ≥8 m·s^{-1}) and circulation at 925 hPa averaged from 20:00 BT on 19 June to 08:00 BT on 20 June 2022, (c) vertical cross sections of horizontal divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}), wind (contour, unit: m·s^{-1}) and circulation along AB in Fig.3a at 03:00 BT on 20 June 2022

合)。本次过程急流配置类似于Luo和Du(2022)研究“21.7”河南极端暴雨时提出的一类耦合机制,即950 hPa边界层急流出口区辐合与700 hPa天气尺度急流左侧正涡度区辐合耦合。但与之相比,垂直方向上本次过程仅有一个位于850 hPa高度附近的强风速中心,而不是在950 hPa和700 hPa分别存在强中心。

进一步分析垂直方向上的动力过程。沿850 hPa急流方向(图3a中AB虚线)作垂直剖面(图3c)。6月19日14:00,此时850 hPa急流强度较弱,925 hPa急流受山脉地形阻挡(存在弱水平辐合),产生弱抬升造成山前迎风坡10~20 mm·h^{-1}的降水(图略)。随后850 hPa急流逐渐增强,14:00—22:00急流强度由12 m·s^{-1}增强至14 m·s^{-1},此时迎风坡上辐合明显增强,上升运动由700 hPa以下发展至600 hPa以上(图略)。到了20日03:00,急流发展至最强,850 hPa附近出现16 m·s^{-1}的强风速核,山前迎风坡之上的低对流层存在等风速线密集带。山脉地形阻挡和急流出口区辐合的共同作用使得辐合层由近地面发展至700 hPa,强度超过-10×10^{-5} s^{-1}(图3c),上升运动进一步发展至200 hPa,造成更多水汽凝结至雨,该时刻观测到110.3 mm·h^{-1}的极端强降水。

3.2 对不稳定层结建立及维持的影响

选取θ_{se}平流来表征暖湿输送。19日21:00,850 hPa上显示桂西北存在θ_{se}大于356 K的高温高湿区并且向东扩展(图略)。随后至20日03:00(图4a),低空急流不断增强,暖湿空气被逐渐向桂东北一带输送,θ_{se}平流强度超过6×10^{-4} K·s^{-1},低层暖湿平流有利于不稳定层结的建立。

分析过程累积雨量最大站点(景区站,110.07°E,25.58°N)附近的对流稳定度($-\partial\theta_{se}/\partial p$)时间演变,在925 hPa至600 hPa的低对流层,θ_{se}基本维持随高度递减的特征,表明过程伴随显著的低层对流不稳定。不仅如此,暖湿气流的持续输送及补充使得大气低层$-\partial\theta_{se}/\partial p<0$贯穿整个降水过程(图4b),不稳定大气结构未因为强降水发生而遭受破坏。不仅如此,夜间随着低空急流暖湿输送的增强,大气低层的对流不稳定度也迅速增大,不稳定能量积聚,为强降水提供有利的发生发展环境。

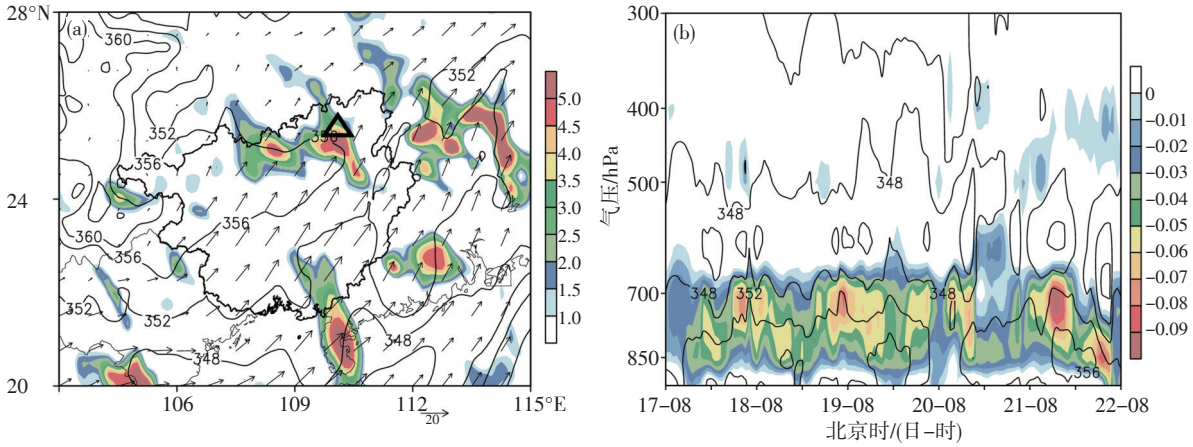

图4 2022年6月20日03:00的850 hPa风场(矢量,单位:m·s^{-1}),θ_{se}(等值线,单位:K)及其平流(填色,单位:10^{-4} K·s^{-1})(a),经暴雨中心(110.07°E,25.58°N,图4a中三角形)θ_{se}(等值线,单位:K)及对流稳定度$-\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}$(填色,单位:K·hPa^{-1})的高度–时间剖面(b)

Fig.4 (a) Distribution of 850 hPa wind (vector, unit: m·s^{-1}), θ_{se} (contour, unit: K) and its advection (shaded, unit: 10^{-4} K·s^{-1}) at 03:00 BT on 20 June 2022, (b) time–height cross sections of θ_{se} (contour, unit: K) and $-\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}$ (shaded, unit: K·hPa^{-1}) along rainstorm center (110.07°E, 25.58°N, triangle in Fig.4a)

4 低空急流的非地转特征及变化原因

以上分析表明,急流具有明显的日间减弱夜间增强的特征,夜间发展的低空急流为对流系统以及降水的发展提供了有利热、动力条件,以下对急流的上述变化成因进行讨论。

4.1 低空急流的超、次地转特征

以往研究常通过气压梯度力的变化来解释风场的日变化现象,由地转关系可知,气压梯度力决定了地转风分量的变化。选取与对流系统发生发展更为密切并且变化更为明显的850 hPa急流进行分析。图5给出急流区平均(108°—112°E,22°—25°N,下同)的850 hPa实际风速和地转风演变,可以看到过程期间风速存在明显波动,每日夜间至第二日早晨具有明显的超地转特征,而在早晨至傍晚则转为次地转。进一步给出108°—112°E平均的850 hPa位势高度水平梯度和地转风场(图6a)。过程期间由于广西处于副高和云贵高原东侧低涡之间,地转风对应为西南风,水平气压梯度与地转风速无明显日间减弱夜间增强趋势,甚至还存在夜间减弱现象(如19—20日、21—22日),这可能

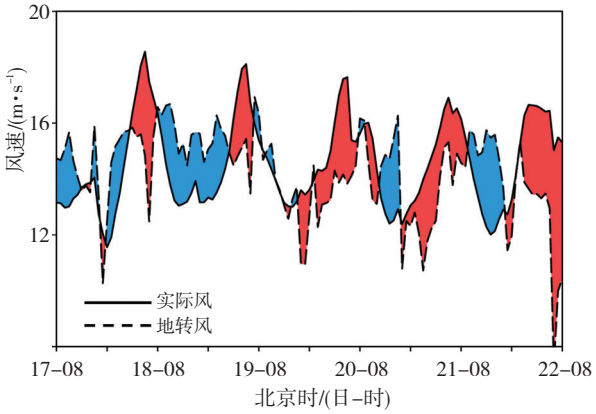

图5 2022年6月17日08:00—6月22日08:00低空急流区区域平均(108°—112°E，22°—25°N)的850 hPa风速演变(红色为超地转，蓝色为次地转)

Fig.5 Evolution of low-level jet area-averaged (108°—112°E, 22°—25°N) wind (unit: m·s^{-1}) at 850 hPa (red and blue shaded indicate upergeostrophic and subgeostrophic respectively) from 08:00 BT on 17 June to 08:00 BT on 22 June 2022

与夜间海陆热力差异减小有关(智协飞等，2022)。综上，此次过程低空急流的变化无法完全由地转风变化来解释，因此以下进一步讨论非地转风的作用。

4.2 惯性振荡机制

大气边界层湍流混合引起的摩擦效应是驱动急流日变化的另一个重要原因，其主要贡献于非地转风分量(Blackadar，1957)。过程期间日间地表被太阳短波加热，表现为地表净短波辐射加热，强度超过2.4×10^6 J·m^{-2}。日间太阳短波加热使得大气对流有效位能不断累积(图6b)，为夜间对流触发蓄势。同时，地表温度日间平均增温达2～4 K，对流层低层湍流混合增强，大气边界层高度在午后由于湍流混合而达到最高，基本维持在1.2 km以上，夜间大气边界层高度随着湍流混合减弱而降低(图6c)。在上述边界层热力状况的变化下，日间湍流混合增强造成急流减速，表现为次地转特征；夜间湍流摩擦作用减弱，急流加速并逐渐呈现出超地转特征(图5)。

上述特征与Blackadar(1957)提出的惯性振荡理论相似。为进一步分析急流的惯性振荡特征，以各时刻风场和日平均风场的差表征非地转风的变化(Dong et al.，2020)。图7给出不同时刻(以6月19—20日为例)非地转风场及实际风速分布。午后地表被加热导致湍流混合摩擦力逐渐增强，非地转风与背景西南

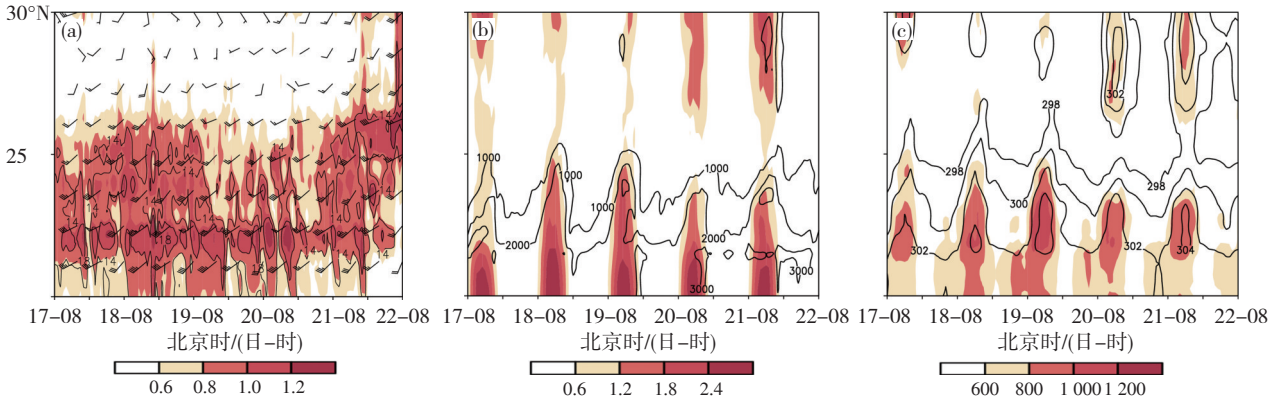

图6 2022年6月17日08:00—6月22日08:00期间108°—112°E平均的850 hPa位势高度水平梯度(填色，单位：10^{-5} dagpm·m^{-1})和地转风场(风向杆，实线为等风速线，单位：m·s^{-1})(a)，对流有效位能(等值线，≥1 000 J·kg^{-1})和地表净短波辐射(填色，单位：10^6 J·m^{-2})(b)，地表2 m温度(等值线，≥298 K)和边界层高度(填色，单位：m)(c)的纬度-时间剖面

Fig.6 Time-latitude cross sections of (a) horizontal gradient of geopotential height (shaded, unit: 10^{-5} dagpm·m^{-1}) and geostrophic wind fields (barb, unit: m·s^{-1}, solid line indicates isotach) at 850 hPa, (b) convective available potential energy (contour, ≥1 000 J·kg^{-1}) and surface net shortwave radiation (shaded, unit: 10^6 J·m^{-2}), (c) 2 meter surface temperature (contour, ≥298 K) and boundary layer height (shaded, unit: m) averaged along 108°—112°E from 08:00 BT on 17 June to 08:00 BT on 22 June 2022

风反向，使急流减弱(图7a)。夜间湍流混合摩擦力减弱，850 hPa非地转风矢量在北半球科氏力作用下顺时针旋转，在次日午夜至深夜，非地转风矢量转变为西南风(图7b、c)，从而增强了背景风，使急流增强(Blackadar，1957)。这种非地转风场的惯性旋转特征在我国华北平原(Pan and Chen，2019)和四川盆地(Zhang et al.，2019)也有相关研究报道，此次过程低空急流演变特征以及降雨峰值时间(约在02:00左右)均与后者相似。但相较而言，桂东北山区地形不如上述地区陡峭(太行山脉、青藏高原以及云贵高原)，因此研究中未具体讨论由于地形导致的热力对比变化的影响。

进一步计算急流区水平动量收支方程各项演变并对其进行定量分析。结果如图8所示，趋势项在夜间20:00—次日06:00呈现规律地加速特征，而在日间为减速，其中最强加速和减速趋势分别为3.17×10^{-4} m·s^{-2}和-3.21×10^{-4} m·s^{-2}。整个过程中科氏力项为主要贡献项，平均强度为2.16×10^{-4} m·s^{-2}，并且在加速趋势最强时段科氏力项基本维持在峰值附近，

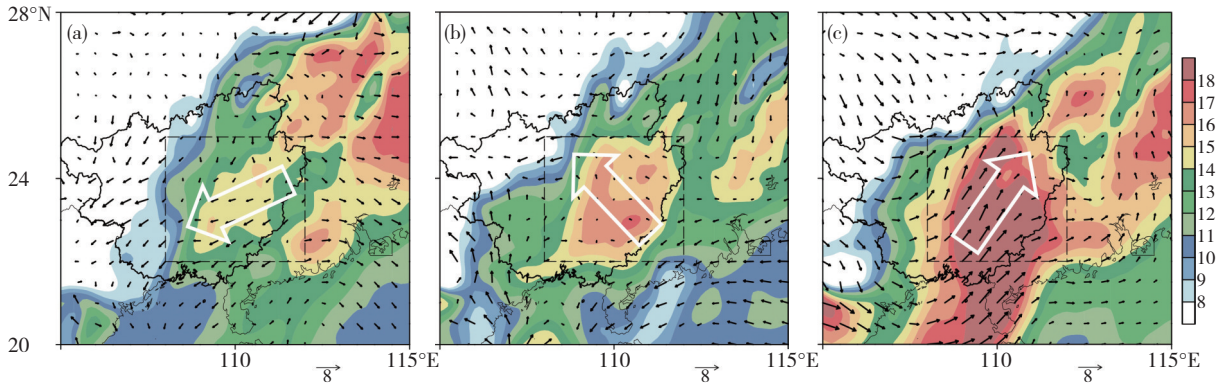

图7 2022年6月19日14:00 (a), 19日22:00 (b), 20日05:00 (c)的850 hPa急流区非地转风场
(白色箭头为方框内风场平均方向)和全风速(填色,单位:m·s^{-1})

Fig.7 Distribution of ageostrophic wind (The white arrow indicates the average direction of the wind field in the box) and full wind speed (shaded, unit: m·s^{-1}) in the low-level jet region at 850 hPa at (a) 14:00 BT on 19, (b) 22:00 BT on 19, (c) 05:00 BT on 20 June 2022

体现了科氏力作用下非地转风对急流变化的影响。相对地,包含摩擦、垂直输送等过程的残差项在整个过程均为负贡献,为急流动量汇,即急流动量一方面由强度最大的850 hPa向其他层次转移,另一方面由摩擦作用耗散,体现在垂直运动较强的05:00以及湍流较强的17:00附近存在残差项负的极大值。上述科氏力项主导动量平衡且残差项耗散急流动量的特征,进一步验证了此次过程低空急流变化主要是由惯性振荡机制引发。相较而言平流项振幅较小,其变化较趋势项存在一定的滞后,这是由于研究区域的上游也存在同位相的风场变化,但其增强或减弱均稍晚于研究区,使得平流作用的贡献落后于趋势项。有研究表明,广西北部湾(Kong et al.,2020)以及我国中东部地区(Zeng et al.,2019)低空急流变化受平流项影响显著,而本研究关注的广西内陆地区则为原地发展型为主,平流项贡献相对较弱。

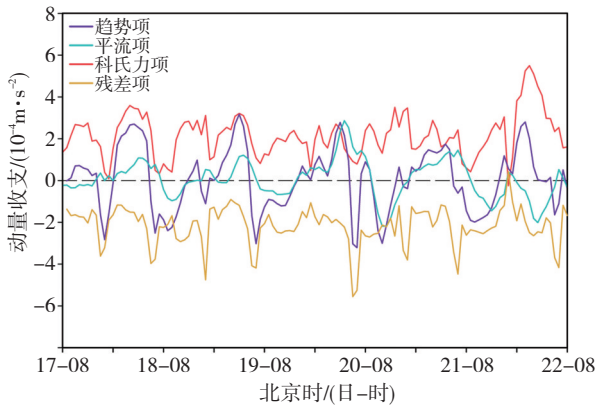

图8 2022年6月17日08:00—6月22日08:00低空急流区区域平均的850 hPa水平动量方程的趋势项、平流项、科氏力项以及残差项演变

Fig.8 Evolution of low-level jet area-averaged tendency, advection, Coriolis force, and residual terms in horizontal momentum equation in the low-level jet region at the 850 hPa level from 08:00 BT on 17 June to 08:00 BT on 22 June 2022

综上,本次过程中低空急流的变化可以由惯性振荡机制较好解释。

5 结论与讨论

基于多源观测资料及ERA5再分析资料,对2022年6月17—22日广西持续性暴雨过程中低空急流的影响及其变化成因进行了诊断分析,得出以下主要结论:

(1) 高层南亚高压东侧辐散"抽吸"、中层低槽前的天气尺度抬升以及低层急流顶端的辐合为此次持续性强降水提供有利环流背景。夜间低空急流明显增强,急流核北侧不断有对流系统发生发展,而日间随着低空急流减弱对流系统也逐渐消亡,造成强降水主要集中于夜间。

(2) 动力条件上,925 hPa急流与850 hPa急流呈错位分布,850 hPa急流左侧正涡度区与925 hPa急流出口区在桂东北一带重合。夜间急流增强后桂北的山脉地形阻挡以及深厚的低层急流辐合使得上升运动向更高层次发展,造成更多水汽凝结至雨。热力方面,随着低空急流暖湿输送夜间增强,大气低层对流不稳定度也迅速增大,不稳定能量积聚,为强降水提供了有利的发生发展环境。

(3) 低空急流变化可以由惯性振荡机制较好解释。日间桂中至桂南地区地表被太阳短波辐射加热,湍流混合摩擦力逐渐增强,造成急流减速。夜间湍流摩擦作用减弱,急流加速并逐渐呈现出超地转特征。在上述机制下,午后非地转风指向西南方向,减弱背景风;次日午夜至深夜,非地转风顺时针旋转为西南风,增强了背景风,使急流增强。动量收支方程诊断表明,科氏力对非地转风的影响是急流动量的主要贡献者,而摩擦耗散、垂直输送等过程为急流动量汇。

本文主要关注了低层风场惯性振荡对低空急流演变的影响,未考虑倾斜地形的热力作用。广西北部地区山岭连绵,地形复杂,坡地上由辐射作用造成的热力改变对低空急流的影响需要进一步通过高分辨率模式来探讨。

参考文献(References):

董良淼,翟丽萍,覃月凤,等.2021. 2018年广西东南部一次暴雨过程分析[J].沙漠与绿洲气象, 15(3):46-54. Dong L M, Zhai L P, Qin Y F, et al. 2021. Comprehensive analysis of heavy rainfall in southeast of Guangxi on 10 May 2018 [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(3):46-54 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.03.006

黄雪松,李妍君,何洁琳,等.2023.广西2022年"龙舟水"期间极端暴雨特征及强度分析[J].气象研究与应用,44(1):76-80. Huang X S, Li Y J, He J L, et al.2023.Characteristics and intensity analysis of the extreme dragon-boat precipitation in Guangxi in 2022 [J]. Journal of Meteorological Research and Application,44(1):76-80 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.13

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. review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,27(5):559-569 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20160505

李青春,程丛兰,全继萍,等.2022.夏季两次不同强度暴雨过程的低空急流特征及其作用对比分析[J].气象,48(11):1384-1401. Li Q C, Cheng C L, Quan J P, et al. 2022. Comparison of characteristics and effects about low-level jet in two rainstorm processes with different intensities in summer [J]. Meteorological Monthly,48(11):1384-1401 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.042001

刘国忠,覃月凤,覃卫坚,等.2023. 2022年广西极端"龙舟水"暴雨过程环境场特征分析[J].气象研究与应用,44(1):7-13. Liu G Z, Qin Y F, Qin W J, et al. 2023. Analysis of environmental field characteristics of an extreme dragon-boat precipitation process in Guangxi in 2022 [J]. Journal of Meteorological Research and Application,44(1):7-13 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.02

王东阡,张耀存.2012.中国东部西南低空急流日变化特征及其机制[J].地球物理学报,55(8):2498-2507. Wang D Q, Zhang Y C. 2012. Diurnal variation of the south-westerly low-level jet over eastern China and its mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics,55(8):2498-2507 (in Chinese). doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.002

叶朗明,苗峻峰.2014.华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,33(1):342-350. Ye L M, Miao J F. 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China [J]. Torrential Rain and Disasters,33(4):342-350 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.006

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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(6):1295-1312 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18207

赵强,王楠,李萍云,等.2017.两次陕北暴雨过程热力动力机制诊断[J].应用气象学报,28(3):340-356. Zhao Q, Wang N, Li P Y, et al. 2017. Diagnosis of thermal and dynamic mechanisms of two rainstorm processes in Northern Shaanxi [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 28(3):340-356 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20170308

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]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(3):444-455 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210119001

Blackadar A K. 1957. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 38(5):283-290. doi:10.1175/1520-0477-38.5.283

Dong F, Zhi X F, Zhang L, et al. 2021. Diurnal variations of coastal boundary layer jets over the Northern South China Sea and their impacts on diurnal cycle of rainfall over Southern China during the early-summer rainy season [J]. Monthly Weather Review, 149(10):3341-3363. doi:10.1175/MWR-D-20-0292.1

Du Y, Chen G X. 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: Convection initiation [J]. Monthly Weather Review,147(2):543-565. doi:10.1175/MWR-D-18-0102.1

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]. Journal of Climate, 27(15):5747-5767. doi:10.1175/JCLI-D-13-00571.1

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730):1999-2049. doi:10.1002/qj.3803

Holton J R. 1967. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain [J]. Tellus,19A:200-205. doi:10.1111/j.2153-3490.1967.tb01473.x

Kong H, Zhang Q H, Du Y. 2020. Characteristics of coastal low-level jets over Beibu Gulf, China, during the early warm season [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,125,e2019JD031918. doi:10.1029/2019JD031918

Luo Y H, Du Y. 2022. The roles of low-level jets in "21·7" Henan extremely persistent heavy rainfall event [J]. Advances in Atmospheric Sciences,40(3):350-373. doi:10.1007/s00376-022-2026-1

Pan H, Chen G X. 2019. Diurnal variations of precipitation over North China regulated by the mountain-plains solenoid and boundary-layer inertial oscillation [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(8):863-884. doi:10.1007/s00376-019-8238-3

Zeng W X, Chen G X, Du Y, et al. 2019. Diurnal variations of low-level winds and rainfall response to large-scale circulations during a heavy rainfall event [J]. Monthly Weather Review,147(11):3981-4004. doi:10.1175/MWR-D-19-0131.1

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]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,124(5):2643-2664. doi: 10.1029/2018JD029834

(责任编辑　何明琼)