

覃皓,农孟松,邱滋,等. 2022年广西“龙舟水”暖区暴雨中低空急流的日变化机制[J]. 气象研究与应用,2023,44(1):20-25.
Qin Hao,Nong Mengsong,Qiu Zi,et al. Diurnal variation mechanism of low-level jet during the dragon-boat warm-sector rainstorm process in 2022 in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(1):20-25.

2022年广西“龙舟水”暖区暴雨中低空急流的日变化机制

覃皓,农孟松*,邱滋,祁丽燕

(广西壮族自治区气象台,南宁 530022)

摘要:利用多源资料,选取2022年广西“龙舟水”期间6月3—4日暴雨过程,进行暖区暴雨中低空急流的日变化机制分析。结果表明:(1)过程期间低空急流在日间减弱而在夜间至次日凌晨加强。夜间在低空急流顶端附近不断有对流系统发生发展,造成桂东北暖区强降水。(2)低空急流日变化可由惯性振荡机制解释。日间非地转风方向与背景风大致相反,使得低空急流减弱,全风速为次地转;夜间非地转风顺时针旋转为西南风,与背景风场叠加导致全风速出现超地转,使得低空急流增强。(3)动量方程诊断表明,低涡东移而副高维持的形势使得过程期间维持较强背景地转风。日间湍流摩擦及平流作用导致低空急流逐渐减弱;夜间科氏力和气压梯度力间的不平衡所导致的非地转过程驱动了低空急流发展增强。

关键词:低空急流;日变化;惯性振荡;非地转风;动量方程

中图分类号: P426.62

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.04

引言

低空急流是广西前汛期暖区强降水事件中常见的天气影响系统。强盛的低空急流一方面通过急流出口区辐合以及与地形相互作用等物理过程为暴雨的发生提供动力条件,另一方面通过输送大量暖湿空气为暴雨的发展及维持提供热力及水汽条件^[1-3]。因此,对低空急流的识别及演变分析常成为暖区暴雨预报的关键一环^[4-5]。

关于低空急流发生发展机制,以往研究^[6]强调了与天气系统强迫相关的地转风变化对低空急流发展的贡献。近年来,越来越多工作表明非地转风在低空急流日变化中同样扮演了重要角色,其中主要通过 Blackadar 惯性振荡理论^[7]以及与倾斜地形相关的 Holton 斜压理论^[8]来解释非地转风对低空急流发展的贡献。Blackadar 惯性振荡理论强调了边界层的湍流混合摩擦作用而 Holton 斜压理论主要考虑了倾斜地形造成的热力差异。不同机制驱动下的低空

急流演变对强降水发生发展的影响具有一定差异。在江淮地区,Blackadar 惯性振荡引发非地转风日变化尺度上的顺时针旋转,产生低层辐合强迫进而调节梅雨锋降水日周期,使得降水峰值出现在清晨^[9]。在我国华北地区,倾斜地形热力差异导致午后山区上空为垂直次级环流的上升支,有利于对流发展;夜间次级环流反转,上升支在太行山东侧华北平原一带建立,导致了该地区夜间强降水^[10]。对于华南沿海地区,海陆热力差异、海南岛动力效应和越南山脉共同作用引发的惯性振荡促进了夜间北部湾边界层低空急流发展,进而导致海岸和迎风坡一带夜间和早晨强降水^[11]。在河南“21·7”极端降水事件中,低涡、倒槽以及西太平洋副热带高压(副高)相互作用维持了较强地转风,增强了天气尺度低空急流,而夜间 Blackadar 和 Holton 机制共同作用造成边界层急流发展,高低层急流的配合为持续性强降水提供了有利热动力条件^[12]。

可见,理清低空急流日变化的成因对于强降水

收稿日期:2022-11-25

基金项目:广西气象科研计划项目(桂气科 2022QN08)、广西自然科学基金项目(2022GXNSFBA035565)、广西壮族自治区气象局短时临近天气预报技术创新团队项目

作者简介:覃皓(1991—),工程师,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,正研级高级工程师,主要从事灾害性天气预报和研究工作。E-mail: nmsong1997@163.com

落区、发生时段等的预报具有重要意义。然而,前人工作对于广西内陆地区低空急流日变化成因讨论较少。2022 年“龙舟水”期间广西遭遇了多场强降水过程,雨势强、落区重叠、致灾性重。最强降水时段多出现于夜间,并与强盛低空急流相伴。因此,本文选取 2022 年“龙舟水”期间 6 月 3—4 日广西一次暖区暴雨过程,对过程期间低空急流的日变化进行分析诊断,以期加深对低空急流发展机制的理解与认识。

1 资料与方法

1.1 采用资料

采用逐小时风云 2G 卫星相当黑体温度(Top Blackbody Brightness temperature, TBB)资料(分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)以及欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料(分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)。其中,高时空分辨率 ERA5 再分析资料在极端降水事件的分析中具有较好适用性^[13],并且对于刻画日变化过程表现良好^[14-15]。所用数据时段为 2022 年 6 月 1—6 日,时间均为北京时。

1.2 p 坐标系下地转风

文中对 p 坐标系下的纬向、经向地转风计算如下:

$$u_g = -\frac{1}{f} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_p \quad (1)$$

$$v_g = \frac{1}{f} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_p \quad (2)$$

式中 $f=2\Omega \sin \varphi$, φ 、 Φ 、 Ω 分别为纬度、位势、地球自转速率。

1.3 水平动量收支方程

利用水平动量收支方程^[16]诊断各因素对低空急流日变化的贡献:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -V_h \cdot \nabla_h V - \omega \frac{\partial V}{\partial p} - \nabla \Phi - fK \times V + Fr \quad (3)$$

方程(3)左侧项为水平风变化趋势项(简称趋势项),右边第一至第五项分别为水平平流项、垂直平流项、气压梯度力项、科氏力项以及残差项(包含摩擦及次网格过程等)。此外,作用于非地转风的科氏力项由气压梯度力项与科氏力项合并得到,即

$$-\nabla \Phi - fK \times V = fK \times V_g - fK \times V = -fK \times V_a \quad (4)$$

2 过程概况及环流背景

2.1 降水概况

2022 年 6 月 1—6 日广西出现一次持续性强降雨过程,过程持续时间长、强度大,落区在桂东北一

带重叠,最大过程累计(1 日 08 时—6 日 08 时)雨量为柳州市融水香粉寨劳气象观测站的 618.6mm。强降雨主要集中于 2—5 日,其中 2 日夜间至 3 日凌晨、3 日夜间至 4 日上午为未受冷空气影响的暖区暴雨,共 11 个自动站累计雨量(2 日 20 时—4 日 20 时)超过 400mm,最大小时雨强达到 94.6mm(3 日 04 时,柳州市融水安太气象观测站),是降雨最强阶段,也是本文讨论的重点时段。此次过程降水存在明显日间减弱,夜间增强特征,降水均在夜间 20 点之后逐渐增强。

2.2 环流形势

降水期间 200hPa 南亚高压控制印度半岛北部至青藏高原南侧,高压东伸脊点位于 115°E 以东。广西位于南亚高压东侧偏西风和东北风的分流区,维持有利降水的高层辐散形势。

500hPa 副高脊线位于 20°N 以南,西脊点位于 120°E 以东,广西处于 586dagpm 线西北侧。强降水开始前,有低槽在贵州西部发展。随后低槽东移至 105°E 附近开始影响广西,广西位于槽底。由于副高阻挡,低槽呈西南东北向,南段移速较慢,与副高形成“西低东高”的形势,广西始终处于两者间的西南气流中。

低层 850hPa 有低涡从云贵高原逐渐发展东移,降水期间广西均位于低涡暖式切变南侧的偏南风暖区中。低空偏南风具有明显的日变化特征,其在白天减弱,在 2 日和 3 日夜间加强为急流,急流核强度最大可达 $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。急流强盛期间,强降水明显发展,位于急流顶端的桂东北一带小时雨量达到 $40 \sim 70 \text{ mm}$,局地超过 90mm。

地面大致为均压场形势,广西位于西南暖低压底部,无明显冷空气影响。

3 低空急流惯性振荡

3.1 低空急流与中尺度对流系统日变化

低空急流的演变与对流系统发展密切相关。图 1 给出强降水落区 $108^\circ\text{E} \sim 112^\circ\text{E}$ 平均 TBB 和 850hPa 风速及风场的时间-纬度剖面,可以看到 6 月 1—5 日广西地区($22^\circ\text{N} \sim 26^\circ\text{N}$)偏南风低空急流经历了 4 次周期性脉动。6 月 1—4 日夜间 20 时左右低空急流开始显著增强,其中 2 日和 3 日夜间至次日凌晨急流强度较大,中心强度超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与降水最强时段相对应。同时,由 TBB 的演变可见,夜间在低空急流顶端附近不断有对流系统发生发展,

TBB 达到 -52°C 以下,并且急流强盛期间对流系统的发展也最为旺盛。日间随着低空急流逐渐减弱,对流系统也趋于消亡。以上表明过程期间低空急流日变化与强对流系统以及强降水的发生发展存在很好的对应关系,三者存在明显正相关。

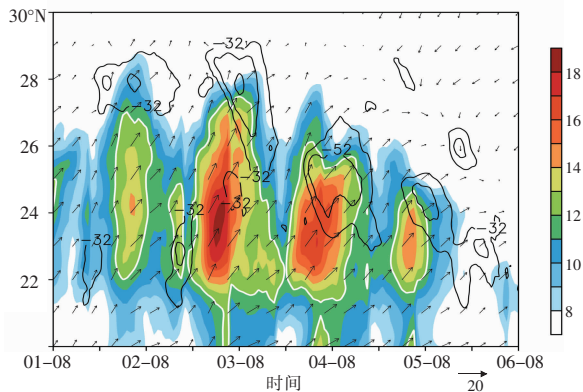


图1 108°E~112°E 平均的 TBB(等值线,只显示 TBB $\leq -32^{\circ}\text{C}$)、850hPa 风速(填色,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和风向(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的时间-纬度剖面

3.2 低空急流的非地转特征

以往研究常通过气压梯度力变化引起的地转风扰动来解释风场的日变化现象^[6]。为探究过程中低空急流日变化是否由地转风扰动主导,图2给出6月3日02时—4日02时急流所在区域(108°E~112°E, 22°N~26°N)平均850hPa全风速、地转风和非地转风演变。可以看到全风速的变化并不与地转风完全匹配,全风速在3日03时—3日19时为一一致的减速特征,而在19时之后加速;地转风速则表现为波动特征,其变化趋势与全风速存在明显差异。

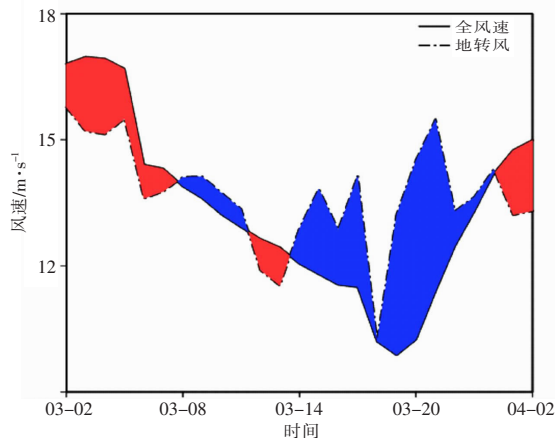


图2 区域平均(108°E~112°E, 22°N~26°N, 下同) 850hPa 风速时间演变(红、蓝色阴影分别为超地转和次地转)

此外,全风速在夜间存在单峰值,而地转风为多峰值。总体而言,夜间至第二日凌晨全风速场具有明显的超地转特征,而在次日早晨至傍晚则转为次地转,因而急流的日变化无法完全由地转风变化来解释。

进一步考察非地转风分量可见,全风速的日变化主要由非地转风主导,两者存在更为一致的变化趋势。平均而言,非地转风在夜间为明显正贡献而在日间为负贡献,这分别与全风速加、减速时段相匹配。

3.3 非地转风惯性旋转

Blackadar 惯性振荡^[7]是驱动急流日变化的重要机制之一,其主要贡献于非地转风分量。该机制认为,日间大气边界层湍流混合摩擦活跃,科氏力与气压梯度力和摩擦力平衡,减弱背景风;夜间摩擦效应减弱使得三力平衡被破坏进而导致非地转风场在北半球科氏力作用下作顺时针旋转,增强背景风场^[9-10]。

为考察非地转风场的变化特征,参考 Dong 等^[11]的方法以各时刻风场和日平均风场的差表征非地转风的日变化。可以看到非地转风场随时间变化具有明显的顺时针旋转特征,6月3日02时—4日02时非地转风矢量旋转接近一周(图3)。3日02—05时,非地转风指向东北方向,与背景西南风场(广西位于低涡与副高间的西南气流中)叠加促进了低空急流发展,使得急流强度超过 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。05—17时非地转风矢量顺时针旋转,偏北风分量逐渐增大,使得全风速不断减小。到了20时,非地转风已转为东北风,与背景场西南风方向相反,受其影响低空急流强度达到最弱,风速减弱至 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。3日夜间至4日凌晨,非地转风又逐渐顺时针旋转为西南风,偏南风风量不断增大,进而与背景风场叠加,使得低空急流发展,急流内部再次出现超过 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强中心。上述非地转风的旋转特征与 Blackadar 惯性振荡理论相符。

3.4 动量收支方程诊断

为进一步验证此次过程低空急流日变化主要由惯性振荡机制引发,根据方程(3)诊断各因素对低空急流水平动量的贡献。若作用于非地转风的科氏力项是动量趋势的主导项且残差项促进了日间急流减速,则可验证惯性振荡是造成低空急流日变化的主要机制^[17]。

研究区内(108°E~112°E, 22°N~26°N)动量收支

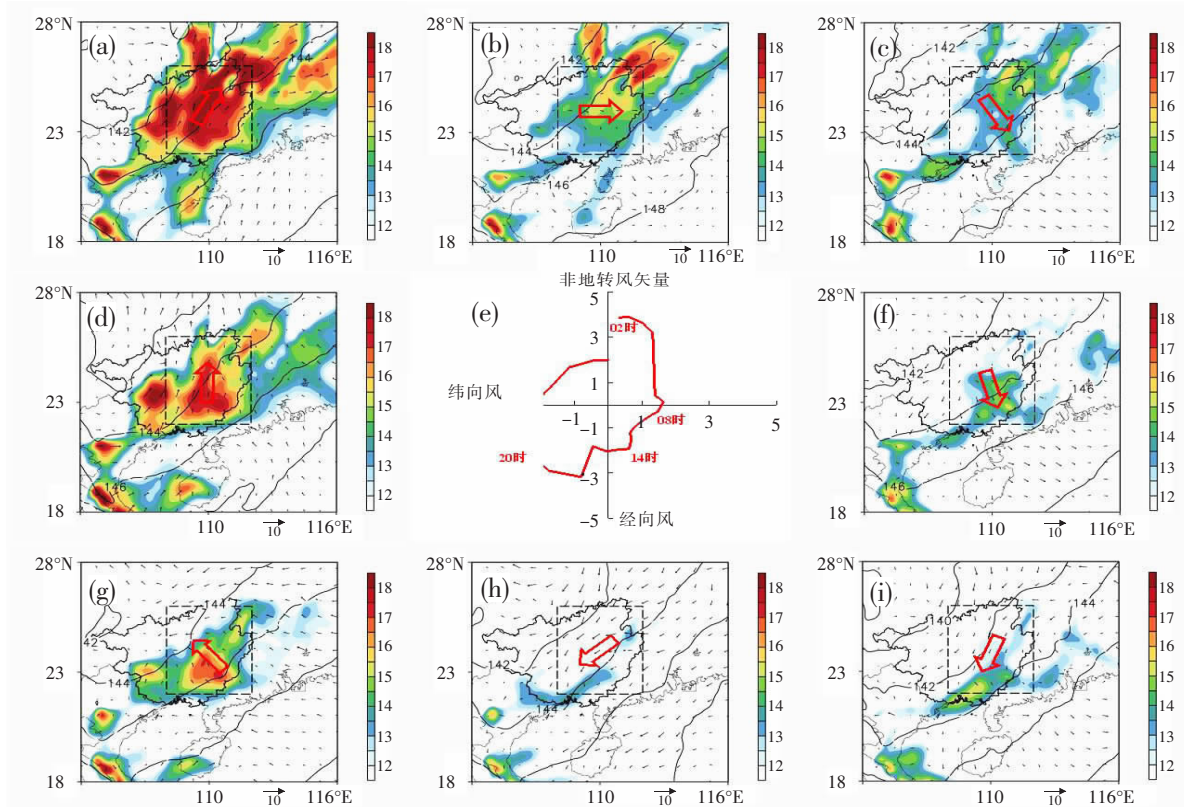


图3 6月(a)3日05时、(b)3日08时、(c)3日11时、(d)4日02时、(e)3日14时、(f)3日23时、(g)3日20时、(h)3日20时、(i)3日17时的850hPa非地转风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、全风速(填色,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及位势高度(等值线,单位: dagpm)分布和(e)6月3日02时—4日02时区域平均的逐小时非地转风矢量(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)演变

方程各项演变如图4所示。6月2—4日,经向风呈现规律性的夜间至次日早晨加速,最大加速率达到 $3\times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (图4a)。可以明显看到经向风的加速由非地转过程驱动,即科氏力和气压梯度力之间的不平衡所导致(灰色阴影)。6月1—4日由于低涡东移而副高维持,研究区内维持较大的气压梯度,使得经向和纬向的气压梯度力项均维持在较大数量级,5日后随着低涡移向东北远离广西,气压梯度力项强度明显减弱。过程期间较强的气压梯度力一方面维持了较强的背景地转风,另一方面对于非地转平衡具有放大作用,解释了较大数量级的非地转风变化^[9,16]。夜间20时左右科氏力项($-fu$)由于纬向风减速(图4b)而达到最小绝对值,气压梯度力超过科氏力从而导致南风加速,使得此时经向风达到加速度最大值。随后由于西风逐渐增强,科氏力逐渐增强,南风加速逐渐减弱,02时南风加速接近于0,此时经向风达到最大值。除此之外,残差项在整个过程始终消耗经向水平动量,其中不仅包含了日间湍流摩擦的作用(符合惯性振荡机制),还存在夜间的次网格过程,需要未

来通过更高分辨率资料分析。

在纬向风方面,同样可以看到夜间至次日早晨加速的特征,最大西风加速率接近 $2\times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (图4b)。类似地,纬向风的加速由明显日变化的科氏力和维持较强强度的气压力梯度力之间的不平衡所驱动,即由作用于非地转风的科氏力项主导。同时,可以看到残差项日间强于夜间,表明日间湍流摩擦效应显著,使得06时左右西风加速开始转为减速,此时西风达到最强,并由科氏力项($-fu$)导致强南风减速(图4a),进而最终使得低空急流在日间逐渐减弱。

此外,整个过程中垂直平流项的贡献较弱。3—4日日间水平平流项在经、纬向风分量上均为负贡献,表明动量由低空急流区向下游输送。综上所述,低空急流夜间增强由作用于非地转风的科氏力项主导,而其日间在湍流摩擦及平流作用下逐渐减弱。因此,Blackadar 惯性振荡机制可用以解释此次过程中的低空急流日变化现象。

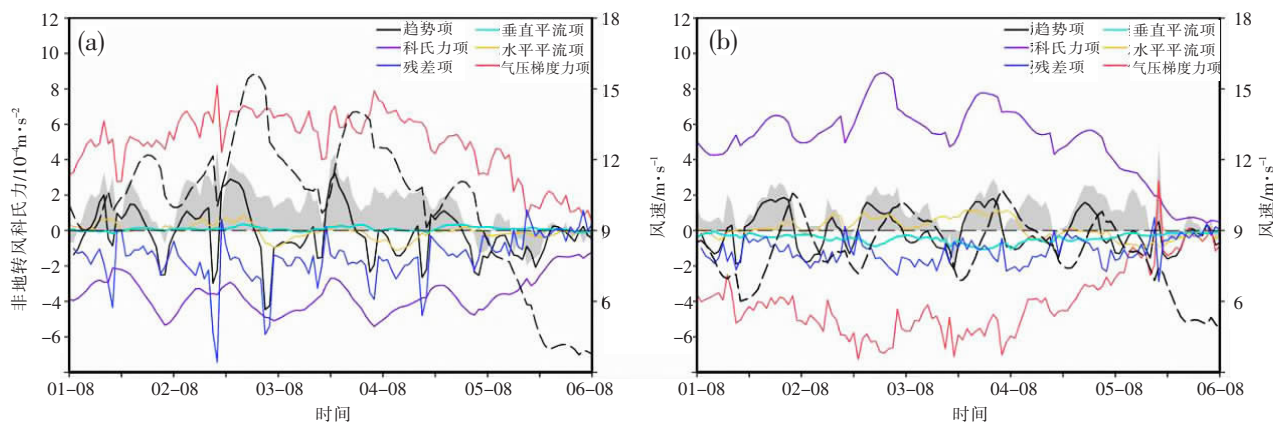


图4 区域平均850hPa水平动量方程各项时间演变(灰色阴影为作用于非地转风的科氏力项,对应左坐标轴;a、b中黑色虚线分别为经、纬向风,对应右坐标轴)

4 结论

基于常规观测以及ERA5再分析资料,本文对广西2022年“龙舟水”期间6月3—4日暖区暴雨过程中低空急流的日变化机制进行了诊断分析,得出以下结论:

(1)低空急流的演变与对流系统、降水的发展密切相关。过程期间低空急流日间减弱而在20时后开始显著增强,夜间至次日凌晨低空急流最为旺盛,与强降水最强时段相对应。同时,夜间在低空急流顶端附近不断有对流系统发生发展,造成桂东北一带明显强降水。

(2)低空急流全风速场在夜间至次日凌晨具有明显的超地转特征,而在次日凌晨至傍晚则转为次地转,其日变化由非地转风主导。非地转风场随时间变化具有明显的顺时针旋转特征。日间非地转风方向与背景风大致相反,使得低空急流减弱;次日午夜至深夜非地转风顺时针旋转为西南风,与背景风场叠加进而增强了低空急流。

(3)低空急流日变化现象可以由Blackadar惯性振荡机制较好解释。低涡东移而副高维持使得过程期间广西一带维持较强的气压梯度力,导致了较强的背景地转风。日间湍流摩擦及平流作用使背景风减速,导致低空急流逐渐减弱。夜间由科氏力和气压梯度力之间的不平衡所导致的非地转过程(即作用于非地转风的科氏力项)驱动了背景风加速,使低空急流逐渐增强。

本文主要讨论了由Blackadar惯性振荡机制引起的非地转过程对低空急流日变化的贡献,而关于倾斜地形热力作用的Holton机制并未涉及,该机制

同样对于非地转风日变化具有重要影响。已有研究表明Holton机制在青藏高原东麓夜雨过程中扮演了重要角色^[18]。桂北地区山岭连绵,地形复杂^[2,19],Blackadar惯性振荡和Holton机制对低空急流日变化的相对贡献需要未来利用更高分辨率资料进行讨论。

参考文献:

- [1] 刘蕾,陈茂钦,张凌云.柳州锋前暖区暴雨的分型及统计特征分析[J].气象研究与应用,2016,37(4):12-17.
- [2] 李向红,伍静,曾毓琳,等.2021年6月27日-7月4日桂东北连续暴雨成因分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):45-49.
- [3] 黄滢,黄春华,刘金裕.广西一次持续性暖区暴雨特征及成因分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):50-55.
- [4] 梁依玲,覃月凤,陈见.2020年广西开汛暖区暴雨特点及预报偏差分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):77-82.
- [5] 何立富,陈涛,孔期.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,2016,27(5):559-569.
- [6] Parish T R, Oolman L D. On the Role of Sloping Terrain in the Forcing of the Great Plains Low-Level Jet[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, 67(8):2690-2699.
- [7] Blackadar A K. Boundary Layer Wind Maxima and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1957 (38):283-290.
- [8] Holton J R. The Diurnal Boundary Layer Wind Oscillation above Sloping Terrain[J]. Tellus, 1967(19A):200-205.
- [9] Xue M, Luo X, Zhu K F, et al. The Controlling Role of Boundary Layer Inertial Oscillations in Meiyu Frontal Precipitation and its Diurnal Cycles over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018.

- [10] Pan H, Chen G X. Diurnal Variations of Precipitation over North China Regulated by the Mountain–Plains Solenoid and Boundary–Layer Inertial Oscillation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019.
- [11] Dong F, Zhi X F, Zhang L, et al. 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*, 2021, 149(10):3341–3363.
- [12] Luo Y H, Du Y. The Roles of Low–level Jets in “21·7” Henan Extremely Persistent Heavy Rainfall Event [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022.
- [13] Li F N, Chavas D R, Reed K A, et al. Climatology of Severe Local Storm Environments and Synoptic–Scale Features over North America in ERA5 Reanalysis and CAM6 Simulation [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(19): 8339–8365.
- [14] Du Y, Chen G X. Climatology of Low–Level Jets and Their Impact on Rainfall over Southern China during Early–Summer Rainy Season [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(24): 8813–8833.
- [15] Chen G X, Du Y, Wen Z P. Seasonal, Interannual and Interdecadal Variations of the East Asian Summer Monsoon: A Diurnal–Cycle Perspective [J]. *Journal of Climate*, 2021.
- [16] Zeng W X, Chen G X, Du Y, et al. Diurnal Variations of Low–Level Winds and Rainfall Response to Large–Scale Circulations during a Heavy Rainfall Event [J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(11):3981–4004.
- [17] Du Y, Zhang Q H, Chen Y L, et al. Numerical Simulations of Spatial Distributions and Diurnal Variations of Low–Level Jets in China during Early Summer [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(15):5747–5767.
- [18] Zhang Y C, Sun J H. Comparison of the Diurnal Variations of Precipitation east of the Tibetan Plateau among Subperiods of Meiyu Season [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129(5):539–554.
- [19] 张凌云, 刘蕾. 柳州 2020 年一次“龙舟水”成因及预报偏差分析 [J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(3):67–71.

Diurnal variation mechanism of low–level jet during the dragon–boat warm–sector rainstorm process in 2022 in Guangxi

Qin Hao, Nong Mengsong*, Qiu Zi, Qi Liyan

(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: Based on multi–source data, the diurnal variation mechanism of the low–level jet in the warm–sector rainstorm process is analyzed by selecting the process of heavy rainfall from June 3 to 4 during the dragon–boat rainy period in Guangxi in 2022. The results showed that (1) During the process, the low–level jet weakens during the day and strengthens during the night to the early morning of the next day. At night, the convective system develops continuously near the top of the low–level jet stream, resulting in a warm–sector rainstorm in northeast Guangxi. (2) The diurnal variation of the low–level jet can be explained by the inertial oscillation mechanism. The direction of the ageostrophic wind in the daytime is opposite to the background wind, which weakens the low–level jet and the total wind speed is subgeostrophic. At night, the ageostrophic wind rotates clockwise to the southwest wind, superimposes with the background wind field and causes the total wind supergeostrophic, which enhances the low–level jet. (3) The momentum equation diagnosis shows that strong background geostrophic wind is maintained during the process due to the eastward movement of the low vortex and the maintenance of the Western Pacific subtropical high. The turbulent friction and advection in the daytime cause the low–level jet weakens gradually. The ageostrophic process caused by the imbalance between the Coriolis force and the pressure gradient force at night drives the development and enhancement of the low–level jet.

Key words: low–level jet; diurnal variation; inertial oscillation; ageostrophic wind; momentum equation