

覃皓,周云霞,农孟松,等.一次桂北暴雨过程中低涡的发展维持机制[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):68-75.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



一次桂北暴雨过程中低涡的发展维持机制

覃皓,周云霞,农孟松,黄晴,苏洵

(广西壮族自治区气象台,广西 南宁 530022)

摘要:利用常规观测、卫星数据及ERA5再分析数据,从动力和热力角度对引发2020年5月24—25日广西北部暴雨过程的低涡发展维持机制进行诊断分析。结果表明:低涡在滇黔桂交界一带生成,随后逐渐发展东移,对流云团及降水落区主要分布在低涡东侧及南侧。涡度方程诊断表明,低涡的发展维持主要受涡度平流项和水平散度项影响。水平风场对涡度的输送使得局地涡度减小,而水平风场的辐合效应使得局地涡度增大。将原始风场分解为地转风和非地转风分量后发现,非地转风分量主导了局地涡度的变化,非地转风水平散度项正贡献最大,扭转项次之,两者是造成低涡发展维持的主要原因。在热力作用方面,低涡发展移动过程中对流层中层附近的潜热加热正反馈也有利于低层低涡的发展维持。

关键词:低涡;涡度方程;非地转;潜热加热

中图分类号:P458.121.1 **文献标识码:**A

文章编号:1002-0799(2024)02-0081-08

低涡是造成我国暴雨过程的重要天气系统。在华南前汛期期间(大致为4—6月),西南低涡常给我国南方地区带来充沛降水。广西位于我国华南西部地区,约50%的年降水量集中于前汛期。已有研究表明,与低涡环流相关的中尺度切变线、强低空急流、大尺度水汽输送以及与地形相互作用等在广西前汛期暴雨中扮演了重要角色^[1-4]。

与影响我国中高纬地区的低涡系统(如东北、华北冷涡等)不同,影响西南和华南地区低涡多位于低对流层,由于受复杂下垫面地形影响,未必都出现闭合中心,其水平特征尺度一般为200~500 km^[1-5]。此外,关于低涡的形成及发展机制,影响华南地区的低涡系统与中高纬地区间存在明显差异。对于中高纬度地区

的低涡系统,许多研究均强调了高低空系统的耦合作用,如高纬度平流层的高位涡沿等熵面南移,诱发中低层涡度快速发展等^[6]。此外,有研究指出低空急流发展所带来的低层辐合以及涡管扭转也是低涡生成发展的重要因素^[7-8]。而在中低纬度区,西南涡通常是冷暖空气在四川盆地(川渝地区)一带交汇形成低涡环流或切变线以及青藏高原东侧复杂地形与大气环流相互作用而形成^[9-11]。卢萍等^[10]研究影响华南持续性强降水的西南涡时,通过涡度收支方程诊断发现在低涡生命史中会受不同涡度变率项的影响,其中中低层主要受涡度平流项和散度项影响,而中高层则是涡度对流项和扭转项的作用更显著。邓承之等^[12]通过再分析资料及数值模拟,对造成川渝地区一次特大暴雨过程的西南低涡的演变机制进行了分析诊断,指出中、低层风场辐合以及垂直输送是主要的涡度源,其中负的非平衡动力强迫对于低层辐合具有重要贡献。郁淑华等^[13]则对2012—2017年不同涡源的西南涡进行了统计分析,认为在青藏高原的东南侧、东侧暖区内正的非热成风涡度对低涡发展具有重要影响,而在盆地生成的低涡则受中层冷空气侵入的影响显著。

可见,前人已对低涡系统的发展和维持机制进

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2023-04-07

基金项目:广西气象科研项目(桂气科2021Z03);广西自然科学基金项目(2022GXNSFBA035565);广西壮族自治区气象局短临天气预报技术创新团队项目

作者简介:覃皓(1991—),男,工程师,主要从事灾害性天气分析及预报研究。E-mail:289055112@qq.com

通信作者:周云霞(1973—),女,高级工程师,主要从事天气分析及预报研究。E-mail:Zhouyunxiachongzuo@163.com

行了深入探讨,结论具有共性但也存在差异,一方面与低涡不同的生成源地有关,另一方面也受低涡活动路径上不同的物理过程影响。因此一些与以往涡源、移动路径具有明显差异的低涡系统的发展维持机制仍值得研究探讨,为低涡暴雨提供预报参考及着眼点。2020年5月24—25日,受低涡影响广西北部出现了一次强降雨过程,此次过程中低涡系统形成于滇黔桂交接一带,源地相较于过往研究中的西南涡偏东偏南^[14],因而关于此类低涡发展维持机制的研究相对较少。那么此类路径低涡与强对流系统及降水的关系如何?此类低涡发展演变与哪些动、热力学因素有关?为探讨上述问题,本文选取本次过程进行诊断分析,以期加深对此类低涡的理解与认知,丰富广西低涡暴雨的机理模型。

1 资料与方法

1.1 使用资料

使用常规地面自动站观测数据,风云2G卫星的相当黑体温度(Top Blackbody Brightness temperature, *TBB*)数据(分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)以及欧洲中期天气预报中心ERA5逐小时再分析数据(分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),变量包括位势高度、温度、比湿、水平风场等^[15]。目前ERA5再分析数据已在暴雨研究中广泛应用^[16-18]。文中时间均采用北京时,所用数据时间段为2020年5月24日08:00—25日20:00。

1.2 研究方法

1.2.1 涡度方程

通过忽略摩擦作用的涡度方程诊断各影响因素对低涡系统中相对涡度垂直分量(简称涡度)的贡献,方程如下^[19]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} \right) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right) - (f + \zeta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (1)$$

式中: ζ 、 u 、 v 和 ω 分别为涡度、纬向风、经向风和 p 坐标下垂直速度;方程等号左侧为相对涡度变化趋势项(简称涡度趋势项),等号右侧第一至第五项分别为相对涡度水平平流项(简称涡度平流项)、地转涡度平流项(简称地转涡度项)、相对涡度垂直输送项(简称垂直输送项)、扭转项以及水平散度项。

1.2.2 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^[20]:

$$u_g = -\frac{1}{f} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_p, \quad (2)$$

$$v_g = \frac{1}{f} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_p. \quad (3)$$

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

1.2.3 凝结潜热加热

计算大气视水汽汇 Q_2 ,表征单位时间内单位质量水汽凝结释放潜热引起的大气加热率,其表达式如下^[21]:

$$Q_2 = -L \left(\frac{\partial q}{\partial t} + V \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right). \quad (4)$$

式中: q 为比湿, L 为相变潜热, V 为水平风矢量。

2 过程概况及影响系统配置

2.1 降水实况

2020年5月24—25日,受低涡影响广西北部出现暴雨到大暴雨天气(图1)。过程累积雨量大,降雨范围广,全区有626个自动站(占全区总站数22.1%)观测到50 mm以上的过程累计(24日20时—25日20时)雨量,175站(占6.2%)100 mm以上,其中最大为百色市田林浪平平山气象观测站203.5 mm。整体雨带分布呈东西走向,强降雨落区自西向东移动,降雨较强时段集中于25日凌晨至上午。

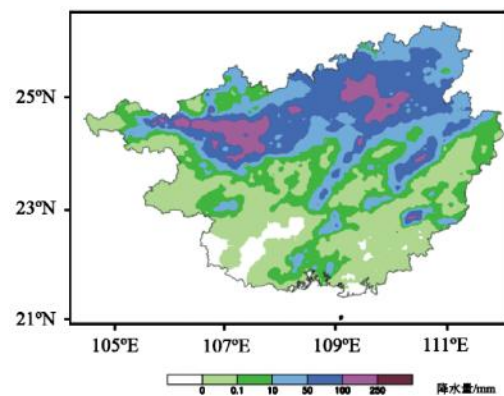


图1 2020年5月24日20:00—25日20:00累计降水量

2.2 低涡环流及中尺度云团演变

过程期间200 hPa形势少变,广西位于高层反气旋式环流东侧偏西风与西北风的分流区,维持有利降水的高层辐散形势。5月24日08:00—25日20:00,中层500 hPa有短波槽从云南中部逐渐东移影响广西,过程期间桂北一带位于槽前,具有较好的天气尺度抬升条件。桂南一带一直处于西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)588位势什米等高线控制下,强盛稳定维持的副高使得短波槽南北向移动较少,以纬向移动为主,主要影响桂北一带。850 hPa

低涡在滇黔桂交界一带生成,随后逐渐发展东移,是此次过程最直接的影响系统,因此以下主要关注低涡背景下的中尺度对流系统演变。

5月24日23:00前后,低涡生成于滇黔桂交界,在其东侧暖式切变线南侧有 γ 中尺度对流系统触发(图2a),局地个别站点小时雨强达到30 mm。随后低涡逐渐东移发展,暖式切变线南侧偏南气流发展为急流,风速达到 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对流云系也逐渐组织化发展, γ 中尺度对流系统合并为中尺度对流复合体(Mesoscale convective complex, MCC),MCC长轴呈西北东南向,TBB达到 $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积超过 $6.1\times 10^4\text{ km}^2$,最强中心达到 $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图2b),造成桂西北地区多站出现短时强降水,小时雨强 $40\sim 60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,局地 $70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上。25日02:00—10:00(图2b~2d),低涡东侧西南急流进一步增强,MCC在低涡东侧及南侧也随之发展得更旺盛,期间多个新生 β 中尺度对流系统并入,使得TBB达到 $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积增大至 $1.1\times 10^5\text{ km}^2$ 以上,长轴由西北东南向逐渐转变为西南东北向,并随低涡环流逐渐东移。在低涡系统及MCC移动路径上,桂北四个市自西向东出现明显强降水,小时雨强为 $40\sim 70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,局地达 $80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,其中桂林市永福苏桥国家站观测到 $110.4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的极端小时雨强。25日11:00—20:00低涡东移至桂东北一带(图2e~2f),强度逐渐减弱,西南风速减弱至 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,对流系统逐渐消亡,降水强度也逐渐减弱。

总体而言,对流云团及降水落区主要分布在低涡东侧及南侧,其发生发展与低涡活动及低空急流演变密切相关。

3 低涡的发展和维持

3.1 低涡的热、动力特征

过850 hPa低涡中心作纬度-高度剖面分析热、动力特征。5日02:00低涡处于发展阶段(图3a), $25.5^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 一带有正涡度柱增强发展,925~600 hPa随高度向北倾斜,850 hPa以及600 hPa分别存在主、次中心,850 hPa主中心强度达到 $3\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。正涡度柱出现在假相当位温(θ_{se})线密集的锋区低层,锋区两侧分别由暖、冷空气控制,暖空气在冷垫上爬升。低涡南侧 θ_{se} 随高度递减,500 hPa以下的低层大气呈现明显的对流不稳定层结特征,有利于此时桂西北一带对流系统发展维持(图2b)。10日08:00低涡发展接近全盛期(图3b),低涡中心附近冷暖空气的对峙 θ_{se} 锋区有所南压,倾斜角逐渐增大,更强的系统性抬升使得低涡南侧对流系统发展更为旺盛(图2d)。此时低涡正涡度柱也进一步发展,形态逐渐由倾斜状转为铅直,高度由近地面层上高层伸展至500 hPa,两个强中心明显增强,涡度大于 $3\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 的面积明显增大。25日14:00冷空气势力减弱以渗透南下为主,桂北一带上空冷空气厚度在850 hPa以下(图3c),冷暖空气交汇减弱,低涡系统也逐渐减弱,低涡中心随冷空气南下至 24.5°N 附近,涡度

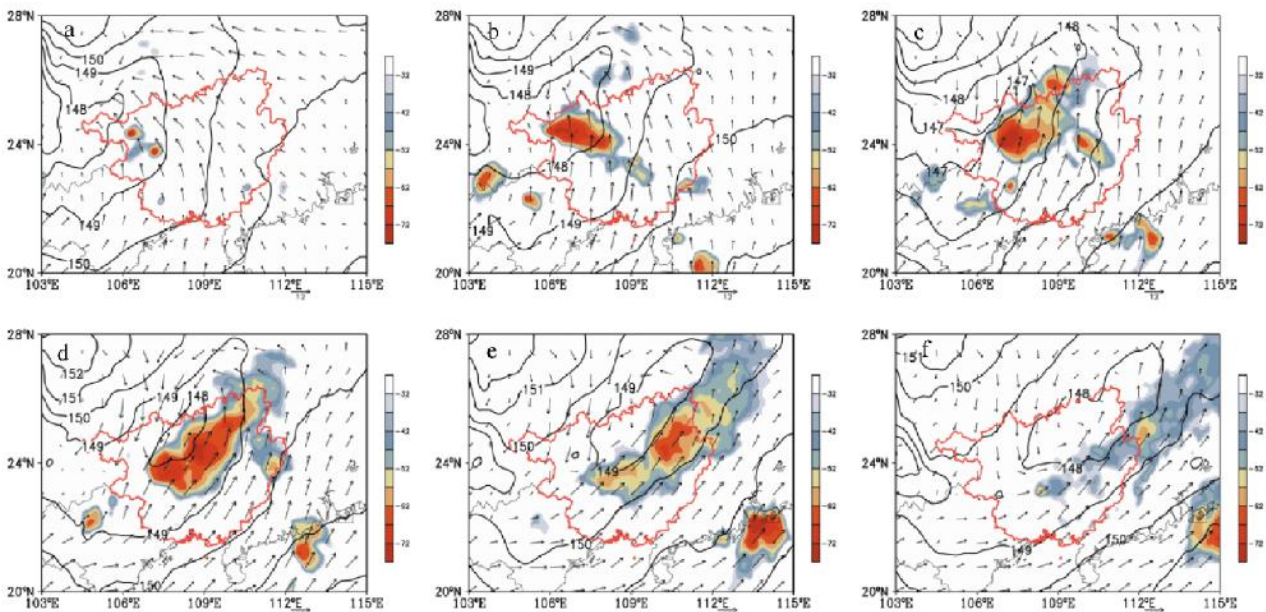


图2 2020年5月24日23:00—25日14:00逐3h的TBB(填色,单位: $^{\circ}\text{C}$),850 hPa位势高度(等值线,单位:dagpm)和风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布
(a~f分别为24日23:00、25日02:00、05:00、08:00、11:00、14:00)

柱形态收缩并接近铅直,但整体强度减弱,仅在925~850 hPa维持 $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的强中心。低涡中心附近则近似为中性层结,层结不稳定性减弱,对流系统也逐渐消亡(图 2f)。

3.2 局地涡度收支诊断

通过涡度方程(1)对低涡的发展及维持机制进行诊断。由低涡发展维持阶段平均(2020年5月25日02:00—25日14:00)的涡度方程各贡献项分布(图4)可知,低涡的发展维持主要受涡度平流项(图4a)和水平散度项(图4d)影响。总体而言,涡度平流项主要为负贡献(由于地转涡度项贡献非常小,图4没有给出,图5同理),水平风场对涡度的输送使得局地涡度减小,不利于低涡发展,负贡献绝对值最大达到 $3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ (图4a)。在涡度源方面,水平散度项为明显正贡献,最大量值达到 $4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$,表明水平

风场的辐合效应(即 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} < 0$)使得 $-(f+\zeta)(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) > 0$,局地涡度增大。相较而言,垂直输送项(图4b)及扭转项(图4c)贡献较小,主要表现为垂直输送作用对局地涡度的增强以及扭转效应(水平风速的垂直变化以及垂直速度水平分布不均)消耗局地涡度。

在垂直方向上,由低涡中心附近($106^\circ \sim 110^\circ \text{E}$, $24^\circ \sim 26^\circ \text{N}$)的相对涡度以及涡度方程各项的时间演变可以看到,低涡的变化过程伴随涡度平流项的负贡献,其耗散中心位于低涡中心附近(图5a)。水平散度项在低涡发展维持过程为正贡献,中心同样在低涡中心850 hPa附近(图5d)。以上结论均与图4相符。类似的,垂直输送项与扭转项分别为相对较弱的正、负贡献(图5b、5c)。垂直输送项表现为将涡度向850 hPa以上高层(800~500 hPa)输送,而扭转项

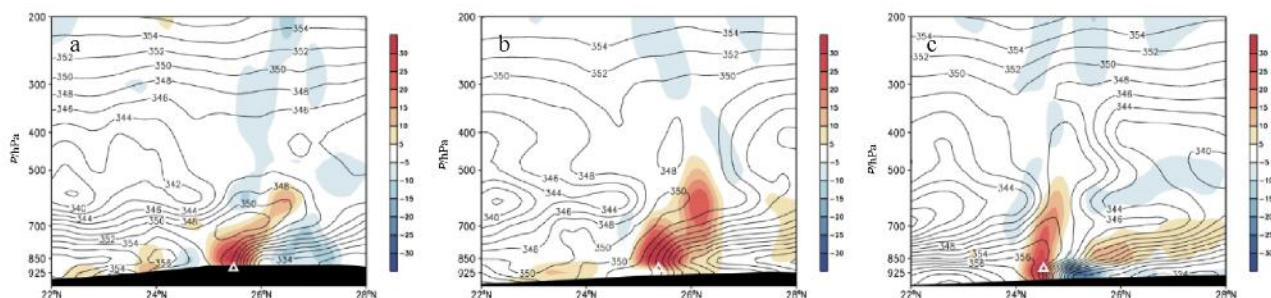


图3 2020年5月25日02:00—14:00逐6h沿低涡中心的涡度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})和假相当位温(等值线,单位:K)垂直剖面
(a~c 分别为沿 106.3°E 、 107.9°E 、 109.2°E ;三角形为低涡中心)

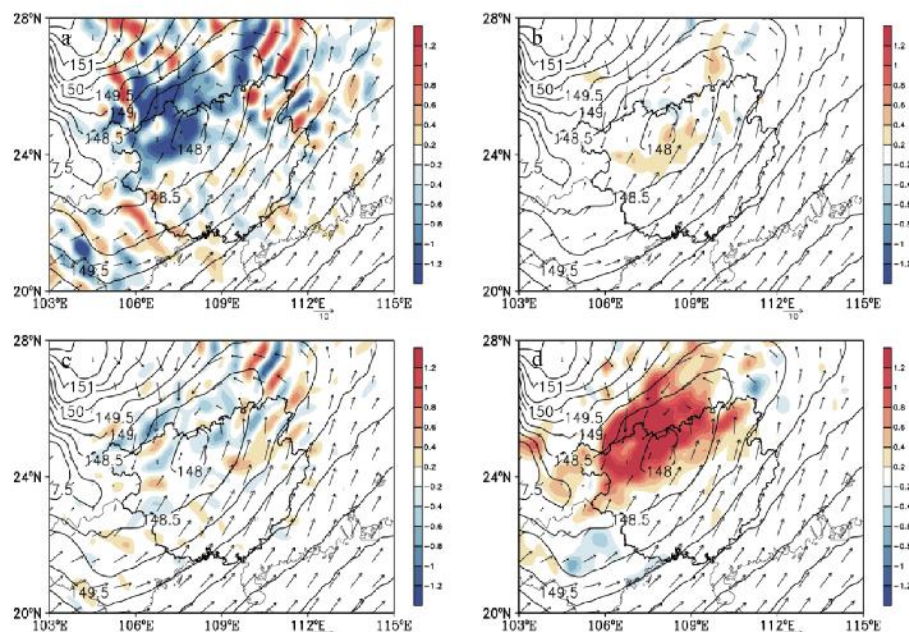


图4 2020年5月25日02:00至25日14:00平均的850 hPa位势高度(等值线,单位:dagpm),风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和涡度方程各项(填色,单位: 10^{-8} s^{-2})分布
(a为涡度平流项,b为垂直输送项,c为扭转项,d为水平散度项)

在相应时段及层次表现为耗散作用,两者大致抵消使得相对涡度仍集中于850 hPa附近。

3.3 非地转风的影响

近年来有研究表明,相较于地转风分量的贡献,非地转风分量在全风速场的涡度变化中起到决定性的作用。如孔期等^[7]在河南“21·7”特大暴雨过程中发现伴随低空急流发展而出现的中低层辐合是造成中尺度低涡增强的重要因素,而其中低空急流的演变受地转偏差风(非地转风)的影响显著。齐铎等^[22]在研究2020年“6·26”冕宁致灾暴雨时指出,四川盆地低涡的发展中地转风分量贡献较小,而非地转风的贡献(主要为水平辐合辐散项)才是造成局地涡度增长的主要原因。目前还鲜有研究讨论造成广西暴雨的低涡系统中非地转风分量的贡献,因此以下分析低涡中心附近850 hPa涡度方程各贡献项的时间序列,并将原始风场分解为地转风分量和非地转风分量进行讨论。这里地转风分量根据式(2)和(3)计算,非地转风分量则为原始场减去地转风分量。

在原始场上,涡度趋势项显示局地涡度在24日22:00—25日10:00为显著增长(图6a)。其中,局地涡度随时间的变化主要由水平散度项贡献,强度平均为 $1.03 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$,而涡度平流项为局地涡度汇,平均为 $-0.7 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$,垂直输送项和扭转项影响相对较小,与3.2节结论相符。将原始风场分为地转风分量与非地转风分量,地转风分量在整个过程中表现为

使局地涡度不断减小(图6b),而非地转风分量则使局地涡度不断增加(图6c)。其中,地转风分量的涡度趋势演变主要由扭转项主导。非地转风分量则主导了局地涡度的变化,非地转风涡度趋势项为原始风场涡度趋势提供了正贡献。总之,非地转风分量中水平散度项正贡献最大,扭转项次之,两者是造成低涡发展维持的主要原因,强度平均为 $1.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$,而涡度平流项消耗了部分局地涡度,强度平均为 $-0.77 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$,是最主要的局地涡度汇。此外,垂直输送项在上述两分量中均为小项。

综上,非地转风分量的作用同样对于广西暴雨过程中的低涡系统具有重要影响。以下进一步讨论非地转风场的演变对于低涡发展维持的作用。由25日00:00—15:00的850 hPa绝对涡度、非地转风场及其水平散度分布(图7)可知,随着低涡中心不断向东南移动,25日00:00—09:00(图7a~7d)低涡中心两侧分别为偏西和偏东非地转风,西侧非地转风逐渐转为西北风而东侧转为东南风,东西侧风场在低涡中心辐合并不断增强,辐合强度最强达到 $-2.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上。该阶段非地转风向低涡中心辐合使得低涡强度不断增强(图6c),绝对涡度超过 $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。25日12:00之后(图7e~7f),低涡东西两侧非地转风均逐渐减弱,使得低涡中心辐合随之减弱,绝对涡度大值区逐渐变得松散,对应该阶段低涡涡度趋势逐渐由正转负(图6a)。

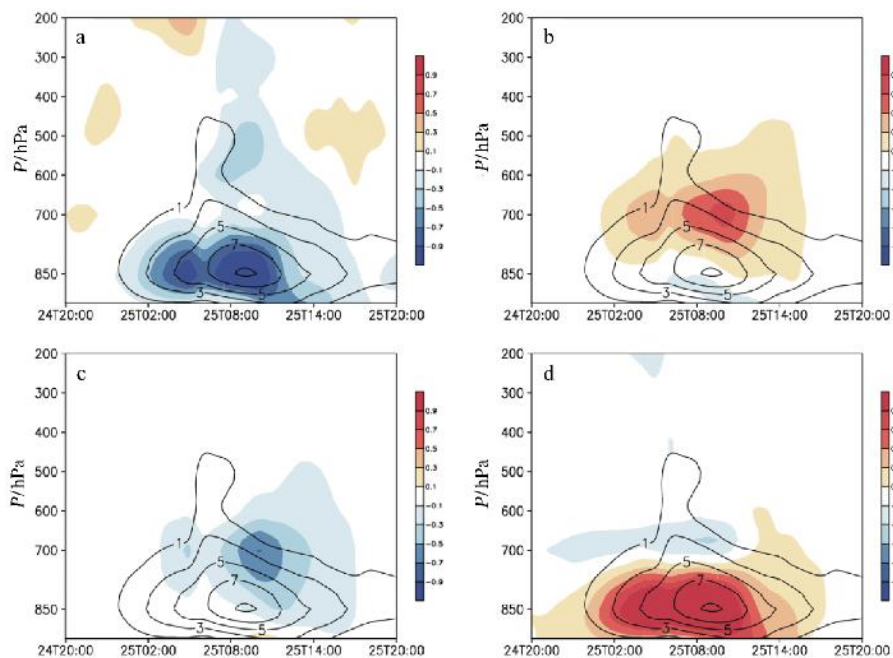


图5 2020年5月24日20:00—25日20:00低涡中心附近涡度(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})和
涡度方程各项(填色,单位: 10^{-8} s^{-2})的时间—高度剖面
(a为涡度平流项,b为垂直输送项,c为扭转项,d为水平散度项)

上述讨论从非地转风变化的角度对低涡发展维持的可能原因进行解释,对于非地转风地转风场的变化,目前研究主要通过惯性振荡机制^[23]以及倾斜地形的斜压热力作用^[24]进行解释。最近也有研究指出,非地转风场的变化还存在上述两种机制的共同作用^[25],因而对于非地转风变化的原因还需未来通过 Du 等^[26]发展的模型进行具体分析。此次过程中低涡自西向东移动,其天气尺度的系统性变化对于非地转风场具有何种影响还需要进一步通过尺度分离进行讨论。

3.4 凝结潜热加热的影响

以上主要从动力角度讨论了低涡的发展维持机制,而在热力方面,非绝热加热的作用对于低涡演变同样具有重要贡献^[6-7,12]。由图 2 分析可知,在低涡发展移动过程中有对流系统旺盛发展,造成低涡路径上强降水,因而与水汽相变相关的较强潜热加热作用不可忽视。以下通过方程(4)计算视水汽汇(Q_2)讨

论凝结潜热加热对低涡的影响。分析低涡中心附近 Q_2 的垂直廓线,发现在低涡发展较为强盛的 25 日 03:00—09:00,凝结潜热加热最强层次主要位于 700~600 hPa,强度约为 $3 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,而在 800 hPa 以下主要为水汽蒸发带来的潜热冷却为主。对流层中层附近的潜热加热有利于对流层低层涡度的快速增强^[6,12],由低涡盛期 25 日 06:00(图 8a)和 09:00(图 8b)的对流层中层 Q_2 以及 850 hPa 风场分布可见,低涡中心附近均存在较强的潜热加热,强度最大达到 $9 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,此时低层 850 hPa 低涡发展维持。此外,25 日 06:00—09:00 随着对流系统发展合并,TBB 小于 -52°C 的面积不断增大,对应更广阔的凝结潜热加热区。

4 结论

对 2020 年 5 月 24—25 日引发桂北暴雨过程的低涡系统的发展维持机制进行了诊断分析,得出以

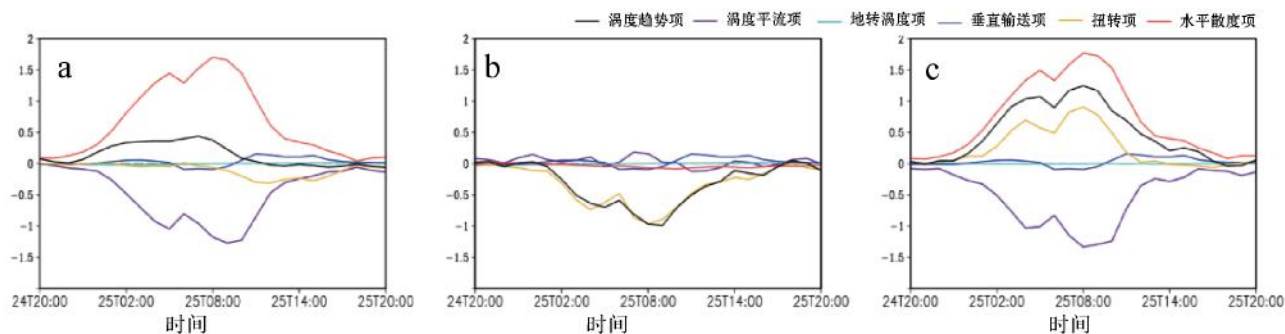


图 6 2020 年 5 月 24 日 20:00—25 日 20:00 低涡中心附近 850 hPa 涡度方程各项时间序列
(a 为原始风场, b 为地转风分量, c 为非地转风分量; 单位: $\times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$)

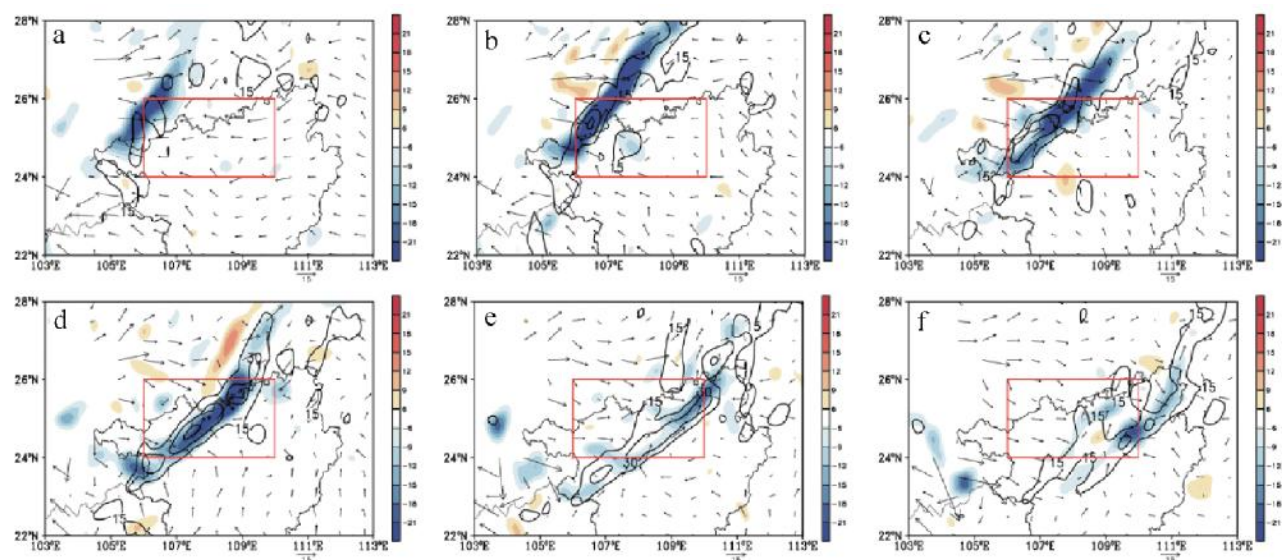


图 7 2020 年 5 月 25 日 00:00—15:00 逐 3 h 的 850 hPa 绝对涡度(等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}),
非地转风场(矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及其水平散度(填色, 单位: 10^{-5} s^{-1})分布
(a~f 分别为 00:00、03:00、06:00、09:00、12:00、15:00; 红框为低涡中心活动区域)

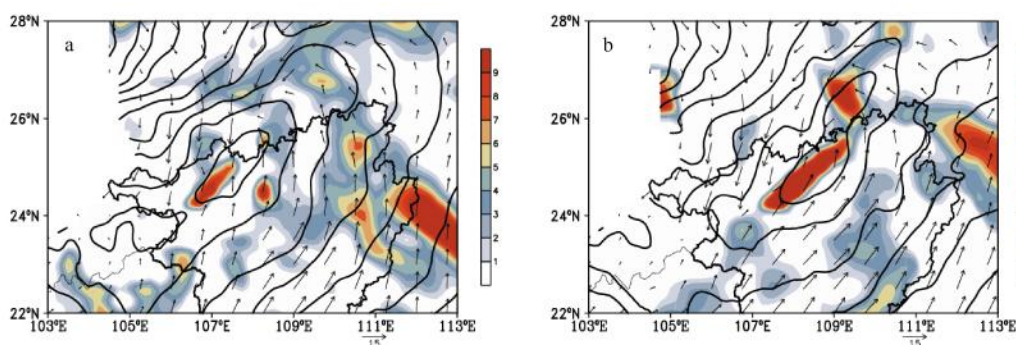


图8 2020年5月25日06:00(a)和09:00(b)的视水汽汇(填色,单位: $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; a、b 分别为700、600 hPa), 850 hPa 位势高度(等值线,单位: dagpm)和风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(空白区为地形高度>1 500 m)

下结论:

(1)大气环流维持有利于降水的高层辐散、中层槽前天气尺度抬升形势。低层850 hPa低涡在滇黔桂交界一带生成,随后逐渐发展东移。对流系统发生发展与低涡活动及低空急流演变密切相关,随着低涡移动,对流云团及降水落区主要分布在低涡东侧及南侧。

(2)低涡发展初期,中心附近存在明显锋区,暖空气在冷垫上爬升。低涡南侧 θ_{se} 随高度递减,低层大气呈现对流不稳定层结特征,有利于桂西北一带对流系统发展维持。低涡全盛期阶段,中心附近 θ_{se} 锋区倾斜角逐渐增大,更强的系统性抬升使得低涡南侧对流系统发展更为旺盛。同时,低涡正涡度柱发展增强,形态逐渐由倾斜状转为铅直并向高层伸展。当冷暖空气交汇减弱,低涡系统也逐渐减弱,低涡中心附近近似为中性层结,对流系统也逐渐消亡。

(3)涡度方程诊断表明,低涡的发展维持主要受涡度平流项和水平散度项影响。涡度平流项为负贡献,即水平风场对涡度的输送使得局地涡度减小,造成低涡中心附近涡度流失。水平散度项为正贡献,表明水平风场的辐合效应使得局地涡度增大。相较而言,垂直输送项及扭转项贡献较小,主要表现为垂直输送作用对局地涡度的增强以及扭转效应消耗局地涡度。

(4)地转风分量在整个过程中使局地涡度不断减小,而非地转风分量则使局地涡度不断增加。其中,非地转风分量主导了局地涡度的变化,非地转风水平散度项正贡献最大,扭转项次之,两者是造成低涡发展维持的主要原因。

(5)在热力作用方面,低涡发展移动过程中有对流活动,造成低涡路径上强降水。强降水带来的凝结潜热加热主要位于700~600 hPa,对流层中层附近的潜热加热正反馈有利于低层850 hPa低涡的发展

维持。

参考文献:

- [1] 傅慎明,赵思雄,孙建华,等.一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究[J].大气科学,2010,34(2):235-252.
- [2] 黄明策,李江南,农孟松,等.一次华南西部低涡切变特大暴雨的中尺度特征分析[J].气象学报,2010,68(5):748-762.
- [3] 陈涛,张芳华,端义宏.广西“6·12”特大暴雨中西南涡与中尺度对流系统发展的相互关系研究[J].气象学报,2011,69(3):472-485.
- [4] 高安宁,赖珍权,张瑞波,等.不同环境风场条件下两次华南西部低涡暴雨个例对比分析[J].气象,2013,39(1):11-19.
- [5] 高守亭.流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用[J].大气科学,1987,11(3):263-271.
- [6] 雷蕾,孙继松,何娜,等.“7·20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究简[J].气象学报,2017,75(5):685-699.
- [7] 孔期,符娇兰,湛芸,等.2022.河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J].气象,48(12):1512-1524.
- [8] 龚婉丁,周玉淑,钟珊珊,等.山东地区一次夏季极端暴雨中尺度系统发展演变过程及机理分析[J].大气科学,2023,47(3):786-804.
- [9] 何编,孙照渤,李忠贤.一次华南持续性暴雨的动力诊断分析和数值模拟[J].大气科学学报,2012,35(4):466-476.
- [10] 李国平.高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(3):1-6.
- [11] 卢萍,李跃清,郑伟鹏,等.影响华南持续性强降水的西南涡分析和数值模拟[J].高原气象,2014,33(6):1457-1467.
- [12] 邓承之,赵宇,孔凡铀,等.“6·30”川渝特大暴雨过程中西南低涡发展机制模拟分析[J].高原气象,2021,40(1):85-97.
- [13] 郁淑华,高文良,彭骏.2012—2017年不同涡源西南低涡多发的影响因素分析[J].暴雨灾害,2021,40(6):577-

- 588.
- [14] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等.影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J].气象,2007,33(1):45–50.
- [15] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [16] 黎颖,张小峰,姚静.汉江流域盛夏暴雨与天气尺度瞬变波 EP 通量的可能联系[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2): 42–48.
- [17] 唐鹏,黄艳,张丽,等.中昆仑山北坡一次极端暴雨天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(6):34–41.
- [18] 王政明,李国平.基于热源作用的青藏高原东坡一次夜间暴雨的诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(1):96–103.
- [19] KIRK J R. Comparing the dynamical development of two mesoscale convective vortices [J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(5): 862–890.
- [20] 周静,郑永骏,苗春生,等.梅雨锋强降水与低空急流日变化的观测分析和数值模拟[J].热带气象学报,2017,33(5):750–761.
- [21] YANAI M, LI C F, SONG Z S. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1992, 70(1B): 319–350.
- [22] 齐铎,崔晓鹏,邹强利.2020 年“6·26”冕宁致灾暴雨成因观测分析[J].大气科学,2023,47(2):585–598.
- [23] BLACHADAR A K. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1957, 38(5): 283–290.
- [24] HOLTON J R. The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain[J]. *Tellus*, 1967, 19(2): 200–205.
- [25] 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*, 2023, 40(3): 350–373.
- [26] DU Y, ROTUNNO R. A simple analytical model of the nocturnal low-level jet over the great plains of the United States[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 71(10): 3674–3683.

Development and Maintenance Mechanisms of the Vortex during a Rainstorm Process in North Guangxi

QIN Hao, ZHOU Yunxia, NONG Mengsong, HUANG Qing, SU Xun
(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract Based on the conventional observation, satellite data and ERA5 reanalysis data, the development and maintenance mechanism of the vortex that causing regional rainstorm in northern Guangxi during 24–25 May 2020 is analyzed from the dynamic and thermal perspectives. The results show that the initial formation of the vortex occurs at the boundary of Yunnan, Guizhou, and Guangxi, following which it gradually intensifies and shifts eastward. The areas of convective clouds and precipitation are predominantly observed on the eastern and southern flanks of the vortex. A detailed diagnosis of the vorticity equation reveals the pivotal influence of the vorticity advection term and horizontal divergence term on the evolution and persistence of the vortex. The vorticity transported by the horizontal wind field contributes to the reduction of local vorticity, while the convergence effect acts to amplify it. By decomposing the primary wind field into geostrophic and ageostrophic wind components, the analysis underscores that the changes in local vorticity are predominantly driven by the ageostrophic wind components. Among these components, the horizontal divergence term of the ageostrophic wind yields the most significant positive impact, followed by the torsional term. These factors collectively serve as the primary drivers behind the development and maintenance of vorticity within the system. Moreover, with regard to thermal effects, the study emphasizes the crucial role of positive feedback from latent heating near the mid-level troposphere during the vortex's evolution and movement, facilitating its continued development and sustenance.

Key words vortex; vorticity equation; ageostrophic; latent heating