

郑 贤,黄 莉,李紫甜,等.南宁市一次非汛期暖区极端短时强降雨形成原因分析[J].气象研究与应用,2024,45(2):120-125.
ZHENG Xian, HUANG Li, LI Zitian, et al. Analysis on causes of the extreme warm-sector short-time heavy rainfall during non-flood season in Nanning[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2): 120-125.

南宁市一次非汛期暖区极端短时强降雨形成原因分析

郑 贤¹, 黄 莉^{1*}, 李紫甜¹, 郭雨奇², 周 琰¹

(1. 南宁市气象局 南宁 530022; 2. 南宁市邕宁区气象局 南宁 530200)

摘要:利用探空、卫星云图、多普勒雷达及加密自动观测资料,分析南宁市2020年3月25日极端短时强降雨的形成原因。结果表明,此次过程没有切变线及锋面参与,是一次弱强迫环境下的暖区暴雨过程,两支高空槽的存在提供天气背景场:高原槽东移使南宁上空处于上干冷下暖湿的对流不稳定状态,高原槽与副高的对峙促进低层双低空南风急流的生成和维持;南支槽则从抬升暖湿气流、槽前正涡度辐合上升及引导暖湿水汽输送三个方面为强降雨的发生提供优越的动力、热力和水汽条件;双低空南风急流为极端短时强降水提供充足的水汽和热力条件,超低空急流出口区的辐合和低空急流入口区的辐散出现的耦合配置,加强中尺度抬升和水汽辐合,促进对流的发生;925 hPa急流顶端的暖湿气团与桂北相对干冷气团形成的露点锋,是对流不稳定能量爆发的触发机制,在925 hPa东南急流顶端,露点锋南侧形成此次过程的最强降雨。

关键词:极端短时强降雨;双低空急流;中尺度露点锋;弱强迫环境

中图分类号: P458.1⁺21.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.2.20

2020年3月25日华南区域突发大范围暴雨过程,最强降雨出现在南宁市,全市出现大雨到暴雨,局部大暴雨,降雨强度及范围均突破非汛期暴雨记录,堪比台风影响过程。此次暴雨过程形成于高空槽前,没有切变线及锋面参与,是一次典型的弱强迫环境下的暖区暴雨过程^[1]。EC、日本、Graps、德国等多家数值模式均漏报此次暴雨过程,EC对高空槽及低层急流位置、强度预报基本正确,但雨量预报以小雨为主,局地中到大雨;中央气象台预报华南地区除桂北有大雨外,其余地区小雨为主,广西壮族自治区气象台、南宁市气象台也未预报有强降雨,说明目前预报业务对弱强迫环境下中尺度突发极端降水预报能力有限,数值天气预报模式也表现出明显的局限性。

前人对弱强迫环境下的中尺度对流系统触发和组织维持机制等也开展一些研究,获得一些可参考的研究成果,如徐珺等^[2]研究广州一次局地突发特大暴雨,认为以暖云降水为主的对流系统产生弱冷池驱动对流系统连续传播,是产生极端小时雨强的原因;孙继松等^[3]对北京地区2009年7月22日一次弱天气强迫下强对流天气过程进行较深入的分析,认为高层冷平流、低层偏南暖湿气流的稳定维持和对流不稳定能量的聚集是强天气增强的必要条件。一直以来,对华南前汛期暴雨的研究,更多的侧重于西风带暴雨的研究,对弱强迫环境下的暴雨研究极少,可借鉴的预报经验不多,所以有必要针对此次过程开展技术分析,以期提高此类天气过程的预报预警能力。

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 广西人工智能天气预报技术创新团队项目、大城市智慧气象服务与应用创新团队项目及桂气科2023M12、桂气科2023QN09项目

第一作者: 郑贤,主要从事天气预报服务研究。E-mail:705075465@qq.com

*通讯作者: 黄莉,主要从事灾害性天气预报服务研究。E-mail:1162307446@qq.com

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用资料为南宁站 2023 年 3 月 24—25 日的 08 时、20 时的实况探空资料 Tlogp、多普勒雷达、卫星可见光云图及地面加密自动站等原始观测资料。

1.2 方法

通过统计方法分析强降雨过程特征,通过系统、能量、热量、水汽等物理量及露点锋的演变分析极端短时强降雨成因。

2 结果与分析

2.1 2020 年 3 月 25 日南宁城区降雨概况

2020 年 3 月 25 日凌晨到晚上,南宁市突发强降雨,全市自动站雨量记录显示,暴雨以上站点达到 53.6%,大暴雨达 5.5%,并伴有雷暴大风及冰雹天气。最强降雨出现在南宁城区,均降雨 80.4 mm,最大降雨量 144 mm,暴雨以上站点达 88.9%,大暴雨以上站点达 22.2%。强降雨主要集中在两个时段,清晨 07—09 时和下午 14—17 时,清晨的暴雨范围及强度均强于下午,两个时段的降雨都呈现明显的对流性降雨特征,大范围持续 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上降雨,07—09 时持续有多站点(07 时 2 个站,08 时 8 个站,09 时 3 个站)小时雨强大于 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大小时雨强 $75.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大 3 h 降雨量 93.2 mm,符合极端短时强降水 1 h 雨量大于 50 mm 的定义^[4]。由于排涝不及时,南宁城区出现 34 处严重内涝,最大积水达 1.4 m,严重内涝又恰逢上班上学期间,道路严重拥堵,主城区交通几近瘫痪,城市运管陷入巨大困境。

2.2 强降雨形成原因分析

此次过程主要分析 3 月 25 日 07—08 时的短时强降雨,所以选取强降雨发生前的 24 日 20 时和 25 日 08 时的资料,以便做演变对比分析。

2.2.1 天气背景分析

24 日 20 时 200 hPa 形势场显示(图略),南宁位于南亚高压南部急流出口处,属于较强的辐散区,有利于大尺度上升运动的维持及大范围强降水的发生发展^[5-7]。

500 hPa 形势场显示(图略), 40°N 以南有两支高空槽维持,一支是从高原东移出来的高原槽,一支是从中南半岛发展的南支槽,两支槽后部都有温度槽配合,槽后冷平流有利于槽的加强。24 日 20 时

到 25 日 08 时(图 1(a)—(b)),高原槽东移,槽顶从 107°E 东移到 114°E ,槽底南伸到 32°N 附近,槽东移过程中引导冷空气南压,广西处于高原槽后的冷平流区,从而在广西上空形成上干冷下暖湿的不稳定大气结构,有利于对流性降雨的发生。在高原槽东移过程中,584 线没有出现明显的东退南掉,说明海面上的副高稳定且强大,高原槽在东移过程中受副热带高压的阻挡,槽与副高之间的气团受到压缩,气压梯度加大使风力加大,促进低层南风急流的形成^[8]。南支槽北端从 98°E 东移到 102°E ,南端则维持少动,使南支槽由近南北向转为东北—西南向,南支槽后冷平流使南支槽在东移过程中不断加深增强,南支槽的作用一方面大尺度抬升槽前暖湿气流,确保降雨的长时间维持^[9]所需的热量和水汽,另一方面南支槽前偏南风分量加大,正涡度平流加大,低层气旋辐合上升运动增强,有利于对流降水的产生^[10],而南支槽前西南气流引导作用,将中南半岛的暖湿气流(图 1(h))源源不断地往华南区域输送,确保强降雨形成所需的水汽和热量条件。

2.2.2 形成暴雨过程的关键因素

850 hPa 形势场显示,24 日 20 时到 25 日 08 时(图 1(a)、图 1(b)),是低空南风急流加强形成的过程,24 日 20 时广西风速大部在 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,但到 25 日 08 时风速普遍加大到 $12 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,急流轴呈西南—东北向,位于崇左—南宁—桂林一带,低空南风急流源源不断地把海面的潮湿不稳定能量向华南区域输送,增强大气不稳定层结,促进强烈上升运动,有利于暴雨的形成^[11]。急流轴附近露点温度达到 $15 \sim 16^{\circ}\text{C}$,高露点温度轴从越南北部向桂林北部维持(图中红色箭头所示),急流区温度露点差在 $0 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 之间,说明低层水汽处于饱和状态。在云南东南部和广东中部,有两个低露点温度中心,中心值在 12°C 以下,与广西的露点温度有 4°C 左右差距,说明广西处于相对高能区中。 30°N 以南为均温区,说明此次过程没有明显冷平流影响。在急流加强过程中,南宁城区清晨暴雨出现,表现出典型的南风急流日变化导致的华南清晨暴雨^[12]。从 850 hPa 与 500 hPa 温差来看(图中绿色数据),南宁温差在 24°C 以上,具有强的温度垂直递减率,有利于对流性降雨的形成。

925 hPa 形势场显示,24 日 20 时至 25 日 08 时(图 1(c)、图 1(d)),超低空南风急流加强形成,根据杜宇提出的双低空急流的概念,此次过程出现双低

空南风急流的架构^[13]。925 hPa 急流轴位于海口—北海—南宁城区一线,与 850 hPa 急流轴交汇在南宁城区一带,超低空急流出口区的辐合与低空急流入口区的中低层辐散出现的耦合配置^[14],加强中尺度抬升和水汽辐合,从而促进对流的发生。在急流轴的北侧,有一支西南—东北向的露点温度轴(图

中红色箭头所示)在越南北部—南宁北部—柳州北部维持,位置较 850 hPa 略偏南约 50 Km,轴南侧露点温度达 18~20℃,轴北侧露点温度在 16℃左右,轴南北两侧有 2~4℃的露点温度差,有利于形成露点锋,30°N 以南区域为均温区,说明边界层没有冷平流的入侵。

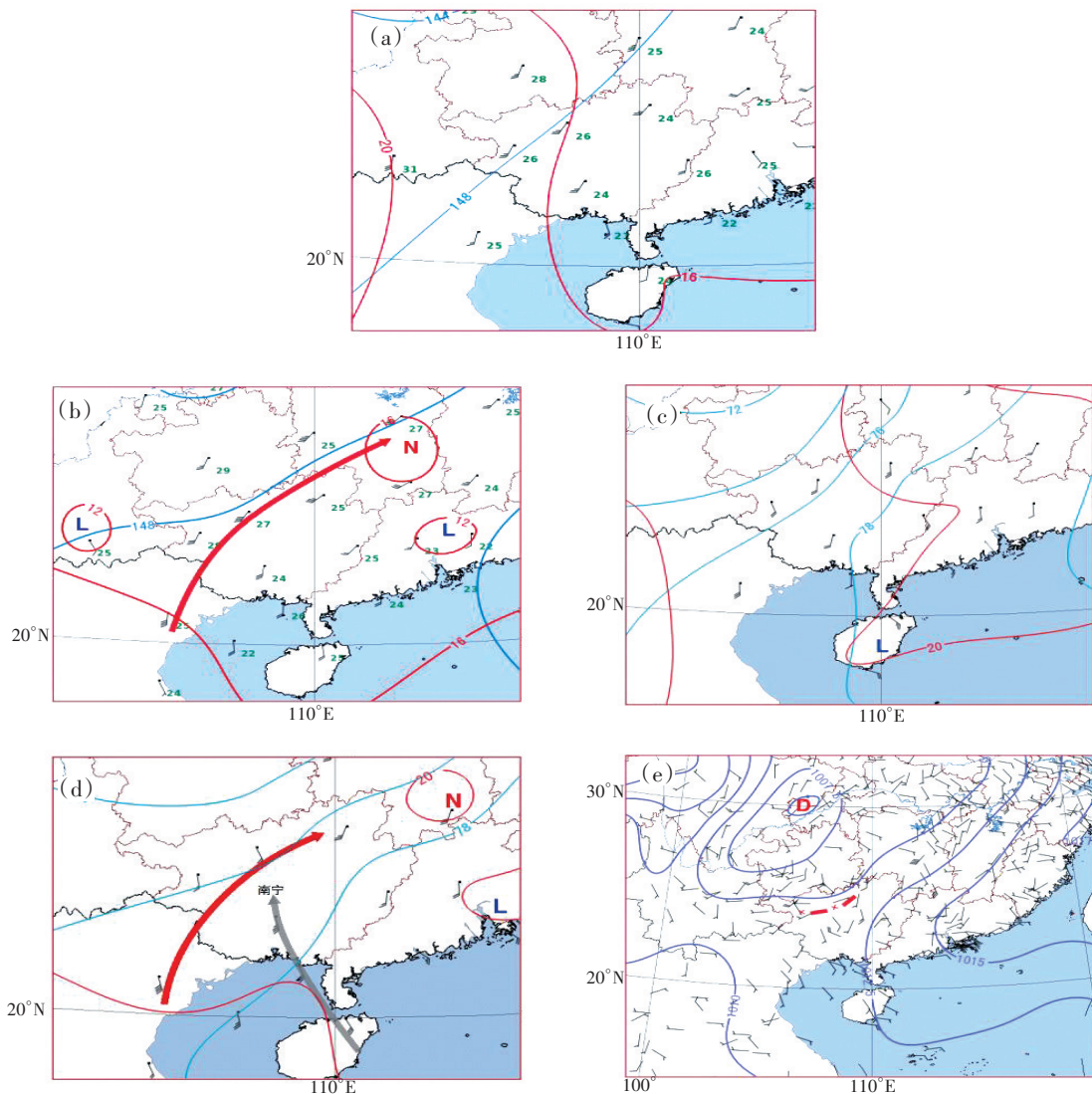


图1 天气形势场

(a)24日20时850 hPa;(b)25日08时850 hPa(a,b,蓝色实线为等高线,红色实线为等温线,红色箭头为露点温度轴,绿色数字为温度);(c)24日20时925 hPa;(d)25日08时925 hPa (c,d,蓝色实线为等高线,红色实线为等温线,红色箭头为850 hPa 急流轴,灰色箭头为925 hPa 急流轴);(e)25日05时地面(红色断点线为露点锋)

2.2.3 暴雨的触发机制

24日20时,暴雨发生前西南地区受西南暖低压控制,华东一带有高压维持,中低纬气压场为东高西低形势,南宁处于低压前部和高压后部的过渡带中,以多云天气为主,前一天白天高温达到28.5℃,

较历年3月高温平均值偏高4℃左右,积累大量不稳定能量。在桂林—百色南—河池与崇左—南宁之间,有明显的偏北风和偏南风的中尺度辐合带。加密自动观测站显示(图1(e)),在25日05时辐合带南压到隆安—武鸣—来宾一带,与南宁主城区最短

距离只有 30 Km 左右,辐合带北侧露点温度大多为 $13 \sim 15^{\circ}\text{C}$,辐合带南侧则为 $16 \sim 17^{\circ}\text{C}$,所以这条辐合带也可以判定为中尺度露点锋。在东高西低的环境场中出现南北向的露点锋是比较少见的,它是由低层两支南风急流输送的暖湿气流与北侧相对干冷空气对比形成,最强锋区位于超低空东南风急流的顶端也就是南宁主城区一带。相对干冷的空气从暖湿空气底部楔入,抬升暖湿气流,触发不稳定能量的爆发^[15],从而在露点锋南侧形成此轮清晨暴雨。

2.2.4 中尺度对流系统触发过程分析

雷达产品可以清晰反映中尺度露点锋触发强降雨发生的过程(图略)。05:30 在广西西南部的崇左市开始有大片强度小于 35 dBZ 的降雨回波生成,在西南气流引导下往东北方面移动,移动过程中超低空急流前侧的暖湿气流受中尺度露点锋持续触发作用,在辐合线南侧对流回波猛烈发展。07:03 西乡塘区—青秀区—兴宁区一带出现 55 dBZ 以上的块状对流回波,07:30 发展为线状 MCS^[16],组合反射率因子大于 40 dBZ 的雷达回波长度在 70 km 以上且长宽比大于 5:1,持续时间 2 h 以上,线状 MCS 位置与中尺度辐合线近于重合。07 时 30 分南宁雷达剖面图显示(图略),50 dBZ 回波到达 10 Km 高度,强回波质心低,55 dBZ 回波接地,降水效率高,雨强大,最大分钟雨量达 2.2 mm,有弱的勾状回波,强回波略向前倾,未形成弱回波区 WER,所以以湿对流为主。地面中尺度辐合线的组织形成后向扩建 MCS,对流新生单体不断在急流后侧生成并汇入线状对流中,其中夹杂多个超级单体,最强回波强度达到 61 dBZ。由于移动方向与强回波排列方向夹角很少,出现“列车效应”,产生此次极端短时强降雨。中尺度辐合线在 08:12 左右在扶绥—南宁良庆区—青秀区东侧减弱消失,此后对流回波迅速减弱,08:35 之后不再出现 40 dBZ 以上的对流回波,以 20 dBZ 以下层状云回波为主,降雨也明显减弱。

以上分析显示,从降雨回波发生加强直至消亡的时间点、分布状态、传播方式、组织形态等均与中尺度露点锋位置、发展消亡时间相吻合,说明此次强降雨的触发机制正是中尺度露点锋。

2.2.5 物理量条件分析

2.2.5.1 水汽、热量演变分析

南宁城区 24 日 20 时与 25 日 08 时探空资料显示(图略),南宁城区上空的水汽是一个显著加强的

过程,24 日 20 时相对湿度大于 80% 的湿层集中在 700 hPa 以下,700 hPa 以上是明显干绝热状态,大气结构呈现为下暖湿上干冷,这是高原槽东移造成的;但到 25 日 08 时,从低层到高层的湿度都出现明显增强,深层到达对流层高层的 300 hPa,说明水汽异常充足,降水效率高,确保暴雨发生所需要的水汽条件。另一方面,水汽往高层发展,也意味着在 24 日夜間,南宁城区上空发生强烈的垂直上升运动,将低层的水汽输送到高层。

24 日 20 时到 25 日 08 时之间, K 指数也出现明显增强,从 36 增加到 39.1(南宁城区出现暴雨的 K 指数一般为 38 以上), K 指数偏强说明 850 hPa 与 500 hPa 的温度直减率大且中低层水汽充足,且水汽垂直递减率低,这些都预示着瞬时降水强度将非常强^[17]。

2.2.5.2 不稳定层结演变分析

垂直运动对对流天气的发生意义重大,主要体现在大气层结的不稳定能量必须在一定的上升运动条件下才能释放出来,其次大气的能量转换主要是通过垂直运动才得以实现,从而进一步影响天气系统的发展变化^[18]。假定气块在上升过程中是绝热无摩擦的情况下,最大上升速度等于 2 倍的 $CAPE$ 值的平方根,24 日 20 时南宁城区 $CAPE$ 达到 1 517,以此推算出南宁城区最大上升速度达到 $56.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,具有强盛的垂直上升运动,25 日 08 时清晨暴雨释放能量, $CAPE$ 值下降到 720。

24 日南宁城区 500 hPa 风速明显加大,从 24 日 08 时到 25 日 08 时,风速从 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加大到 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,深层垂直风切变(6 km 高度与地面之间的风矢量之差的绝对值)达 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,属于中等到强的垂直风切变,垂直风切变对对流的形态和组织结构具有关键性作用,有利于 25 日清晨组织性完好的对流风暴的发展和维持^[19]。

24 日 20 时 850 hPa 和 500 hPa 假相当位温差达到 12.6,假相当位温随高度明显减小,说明此时气块内能大,温度较高,密度比环境空气小,容易产生剧烈的上升运动,即对流非常不稳定。24 日 20 时到 25 日 08 时, SI 指数从的 -0.56 增强到 -2.08 ,有利于对流性降雨的发生;抬升指数 LI ,24 日 20 时到 25 日 08 时分别为 -3.82 和 -2.8 ,说明大气处于较强的不稳定层结状态,只要有适当的触发条件,很容易产生短时强降雨。

以上分析显示,24 日夜間,南宁城区上空有强

烈垂直上升运动,将低层水汽输送到对流层上部,使整层大气保持深厚的深层,降水效率高有利于形成暴雨;此外,大气对流层结不稳定,有中等到强的垂直风切变,在中尺度露点锋的触发作用下,形成此次极端短时强降雨。

3 结论与讨论

此次过程是一次弱强迫环境下的暖区暴雨过程,是在高空槽和双低空南风急流共同作用下产生的,而露点锋是不稳定对流的触发机制。主要结论如下:

(1)500 hPa 两支高空槽的存在,为此次极端短时强降雨的发生提供天气背景场:高原槽东移使南宁上空处于上干冷下暖湿的对流不稳定状态,高原槽与副高的对峙,促进低层双低空南风急流的生成和维持;而南支槽则从抬升暖湿气流、槽前正涡度平流辐合作用及水汽能量输送三个方面,为强降雨的发生提供优越的动力、热力和水汽条件。

(2)双低空南风急流在大尺度天气形势背景支持下的稳定维持,为极端短时强降雨的形成提供充足的水汽和热力条件,也进一步促进对流不稳定层结的加强和维持。

(3)925 hPa 急流顶端的暖湿气团与桂北相对干冷气团形成的露点锋,是触发对流不稳定能量爆发的机制,从而在 925 hPa 东南急流顶端,露点锋南侧形成此次过程的最强降雨。

当冷空气不明显时,往往分析不出切变线和锋面,数值模式给出的雨量预报往往偏小,容易出现暴雨漏报的情况,预报员不能过于依赖数值模式的要素预报,需从天气背景入手,开展更细致深入的分析,尤其当有双低空南风急流的维持,又有高空槽及地面有利形势配合时,需要考虑弱强迫环境下发生暖区暴雨的可能性。

参考文献:

[1] 付伟基. WRF 模式对弱强迫系统中雷暴预报个例研究[J]. 气象科学, 2009, 29(3): 323-329.

- [2] 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 2018, 76(4): 511-524.
- [3] 孙继松, 杨波. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学, 2008, 32(6): 1352-1364.
- [4] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 371-386.
- [5] 俞小鼎. 短时强降雨临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 202-224.
- [6] 李建辉. 华南初夏的超低空急流及其对暴雨的影响[J]. 气象学报, 1982(3): 319-326.
- [7] 杜杰, 薛惠娴. 一次暖区暴雨特大暴雨强度及落区的探讨[J]. 热带气象学报, 1985, 1(1): 85-92.
- [8] 高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 833-846.
- [9] 章国材, 矫梅燕, 李延香, 等. 现代天气预报技术和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 118.
- [10] 周慧, 周莉, 刘电英, 等. 2015 年 11 月湘江流域罕见的冬季暴雨天气过程分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 136-139.
- [11] 胡宁, 符娇兰, 汪会. 华南前汛期强降水个例模式降水预报误差成因初探[J]. 气象, 2020, 46(8): 1026-1038.
- [12] 孙继松. 短时强降雨和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(6): 498-506.
- [13] 姚晨, 张雪晨, 毛冬艳. 滁州地区不同类型特大暴雨过程的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(11): 18-25.
- [14] DU Y, CHEN G. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: Convection initiation[J]. Monthly Weather Review, 2019, 147(2): 543-565.
- [15] 马长健, 李艳, 徐邦琪. 双低空急流对“21·7”河南极端暴雨的影响[J]. 大气科学, 2023, 47(5): 1611-1625.
- [16] 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 53.
- [17] 张小玲, 余蓉, 杜牧云. 梅雨锋上短时强降水系统的发展模态[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 770-781.
- [18] 王丛梅, 俞小鼎. 2013 年 7 月 1 日河北宁晋极端短时强降水成因研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 105-116.
- [19] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法(第四版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 381.

Analysis on causes of the extreme warm-sector short-time heavy rainfall during non-flood season in Nanning

ZHENG Xian¹, HUANG Li^{1*}, LI Zitian¹, GUO Yuqi², ZHOU Yan¹

(1. Nanning Meteorological Bureau, Nanning 530022, China; 2. Yongning District Meteorological Bureau, Nanning 530200, China)

Abstract: The causes of the formation of extreme short-time heavy rainfall in Nanning on March 25th, 2020 was analyzed by using sounding data, satellite cloud images, Doppler radar and encrypt automatic observations. The results show that it is a warm-sector heavy rainfall process under a weak forcing environment without the involvement of shear lines and fronts. There are two upper-air troughs that provide the weather background. The plateau trough moving east makes the air over Nanning in a state of convection instability with dry and cold air above and warm and wet air below, and the confrontation between the plateau trough and the subtropical high promotes the formation and maintenance of the double-low-level southerly jets. On the other hand, the south-branch trough provides excellent power, heat and water vapor conditions for the occurrence of heavy rainfall in terms of lifting up the warm and wet air flow, rising up of positive vorticity in front of the trough, and guiding the warm and wet water vapor transport. The double low-level southerly jets provide sufficient water vapor and thermal conditions for the extreme short-time heavy rainfall. The coupling configurations of convergence in the exit area of the ultra-low-level jet and divergence in the entrance area of the low-level jet strengthen the mesoscale uplift and water vapor convergence, and then promote the occurrence of convection. The dew-point front, which is formed by the warm and humid air mass at the top of the 925 hPa jet and the relatively dry and cold air mass in northern Guangxi, is the triggering mechanism for the convective unstable energy outburst. The heaviest rainfall occurs at the top of the 925 hPa southeasterly jets, where is also at the south side of the dew-point front.

Key words: extreme short-time heavy rainfall; double low-level jets; mesoscale dew-point front; weak forcing environment