

周琰, 翟丽萍, 张丁丁, 等, 2024. 广西南宁一次“龙舟水”暴雨空报事件对流生消成因分析[J]. 气象, 50(8): 941-952. Zhou Y, Zhai L P, Zhang D D, et al, 2024. Causes for convection generation and dissipation in an unsuccessful “dragon boat water” rainstorm prediction event in Nanning of Guangxi[J]. Meteor Mon, 50(8): 941-952 (in Chinese).

广西南宁一次“龙舟水”暴雨空报事件 对流生消成因分析*

周 琰¹ 翟丽萍² 张丁丁¹ 樊 盛² 黄卓帆¹ 李渝平¹
李紫甜¹ 潘杰丽¹ 黄增俊³

¹ 南宁市气象局, 南宁 530029

² 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022

³ 广西南宁市邕宁区气象局, 邕宁 530200

提 要: 2022 年 6 月 13 日, 广西出现大范围暴雨过程, 而南宁市区一带暴雨空报; 雷达回波在南宁市区北侧衰减、东侧强度维持、南侧新生发展, 过程演变复杂。文章采用常规观测资料及 ERA5 再分析资料, 对此次过程中对流生消演变成因进行分析。结果表明: 此次过程为典型广西前汛期强降雨环流形势及环境背景; 然而受天气尺度冷平流及风暴冷池共同影响, 冷空气快速移过南宁市区, 北侧风暴出流边界远离母体, 风暴前侧低层水汽输送偏东, 热力、动力条件均较差, 导致回波衰减消散; 南宁市区东侧风暴在推进过程中出流边界紧贴母体, 风暴前侧低层维持西南急流, 沿出流边界不断有对流触发, 风暴得以加强或维持; 南侧低层高温高湿环境形成, 有利于对流有效位能重建或增强。最后建立了此次过程对流生消演变机理概念模型, 并通过分析冷池、出流边界、环境条件等要素演变, 可对短时临近预报进行补充订正。

关键词: 暴雨空报, 对流生消, 冷平流, 冷池, 出流边界

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.071001

Causes for Convection Generation and Dissipation in an Unsuccessful “Dragon Boat Water” Rainstorm Prediction Event in Nanning of Guangxi

ZHOU Yan¹ ZHAI Liping² ZHANG Dingding¹ FAN Sheng² HUANG Zhuofan¹
LI Yuping¹ LI Zitian¹ PAN Jieli¹ HUANG Zengjun³

¹ Nanning Meteorological Bureau, Nanning 530029

² Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

³ Nanning Yongning Meteorological Office of Guangxi, Yongning 530200

Abstract: On June 13, 2022, a large-scale regional rainstorm event occurred in Guangxi. During this period, a rainstorm false alarm was issued for the downtown area of Nanning. The echo attenuated in the north side of Nanning City, maintained in the east side and developed in the south side, which made the process complicated. This article investigates the causes for the generation and dissipation of the convection during this event by utilizing various observational data and ERA5 reanalysis data. The results are as follows. The circulation background of this process was the typical heavy rainfall circulation and ambient condition in the

* 中国气象局复盘总结专项项目(FPJ2024-098)、广西气象科研计划指令性项目(桂气科 2023ZL08、桂气科 2024ZL08)、广西气象科研计划面上项目(桂气科 2023M15)和广西气象科研计划青年人才培养项目(桂气科 2023QN09)共同资助

2024 年 4 月 6 日收稿; 2024 年 7 月 12 日收修定稿

第一作者: 周琰, 主要从事短期、短时临近天气预报研究. E-mail: 370511486@qq.com

通讯作者: 翟丽萍, 主要从事短时临近预报和灾害性天气研究. E-mail: mast2535@163.com

first rainy season in Guangxi. However, under the combined influence of synoptic-scale cold advection and storm cold pool, the cold air quickly moved over Nanning City, and the outflow boundary formed by the storm in the north side of Nanning moved away from the storm parent body. Meanwhile, the low-level water vapor transport in the front of the storm moved eastward, resulting in poor thermodynamic and dynamic conditions, leading to the attenuation and dissipation of echoes in the north side of Nanning City. In the east side of Nanning City, the outflow boundary of the storm was next to the storm parent body during its advancing, and the lower layer ahead of the storm kept the southwest jet stream so that the storm was strengthened or sustained by continuous convective cells triggered along the outflow boundary. There was a low-level high temperature and high humidity environment in the south side of Nanning, which was conducive to the reconstruction or enhancement of convective available potential energy. Based on the above, a conceptual model of the evolution mechanism of convection generation and dissipation in this process has been built, and with it, the short-time and nowcasting forecasts can be supplemented and corrected by analyzing the evolution of cold pool, outflow boundary and ambient conditions.

Key words: rainstorm false alarm, convection generation and dissipation, cold advection, cold pool, outflow boundary

引 言

南宁作为广西首府,是多项重大社会活动及高级别赛事的举办地,已形成以气象预警为先导的防灾减灾工作机制,人民生活及城市治理对气象保障服务要求很高;同时,南宁地处广西中南部,属亚热带季风气候区,既受锋面系统影响,也受热带系统影响;地形复杂,表现为以邕江广大河谷为中心的盆地形态。因此,受气候背景、特殊地理位置、复杂地形及城市热岛效应的影响,南宁天气多变,中尺度对流系统的触发及演变机制非常复杂,对流触发、增强和衰减的临近预报存在很大难度,为提供精准气象服务保障城市安全运行带来了巨大挑战。

对于对流的触发、增强和衰减机制,国内外学者普遍认为其生成与大气层结的不稳定程度、水汽条件和抬升触发机制有关。垂直风切变对雷暴的形态和组织结构起关键作用(Doswell III, 1987; Wilson and Roberts, 2006; 雷蕾等, 2021)。Moncrieff and Miller(1976)认为,对流有效位能(CAPE)和对流抑制能量(CIN)是综合静力不稳定和水汽条件的重要对流参数,能较为清晰地表示整体大气的垂直不稳定程度,是判断对流潜能的重要依据。抬升触发机制方面,Doswell III(1987)分析认为,触发对流的上升气流绝大多数是由中尺度系统提供的。Wilson and Schreiber(1986)指出,多数对流都生成在边界层辐合线附近。崔新艳等(2021)整理了国内外关于

对流初生机理的研究成果,提出 CAPE 和 CIN 值对局地温度尤其是湿度的变化很敏感,对对流初生的影响很大。不少学者研究总结发现对流风暴及其出流边界的相对位置是造成对流加强、减弱的主要因素之一:当对流风暴距离辐合线较近,特别是其出流边界紧贴雷暴主体时,多数对流强度维持或增强;当对流风暴逐渐远离其出流边界时,对流强度往往减弱(Wilson and Mueller, 1993; Wilson and Megenhardt, 1997; Wilson et al, 1998; 俞小鼎等, 2020; 章翠红等, 2018; 何娜等, 2023; 陈小婷等, 2023; 高帆等, 2022)。

“龙舟水”是指端午节前后发生在华南地区的前汛期强降水天气。研究指出,华南前汛期暴雨包括“龙舟水”的发生,与锋面降水和季风对流降水密切相关(郑彬等, 2006; 吴志伟等, 2006; 林良勋等, 2009)。2022 年华南极端“龙舟水”期间(5 月 21 日至 6 月 22 日),华南平均降水量为 1951 年以来第二多,其中广西降水量为历史同期最多。不少学者对此进行了研究分析,伍红雨等(2024)指出 2022 年华南极端“龙舟水”与大气环流和海温异常相关;刘国忠等(2023)总结了近 30 年广西大洪水年“龙舟水”最强暴雨过程的大尺度环流背景和物理量特征、降雨特征与洪峰的相关性;覃皓等(2023)通过 Blackadar 惯性振荡机制解释了 2022 年 6 月 3—4 日广西暖区暴雨过程中低空急流夜间发展增强的成因;梁岱云等(2023)对 2022 年“龙舟水”期间南宁暴雨过程的数值模式与实况降水进行对比分析,发现南宁

上空不稳定能量及水汽条件较好,但暴雨预报空报、漏报较多,数值模式对空报个例预报存在系统性偏差。目前对“龙舟水”期间南宁地区中尺度对流系统演变的研究仍较少,难以满足本地日益增长的精细化气象服务保障需求。2022年6月13日,广西出现了大范围暴雨过程,期间南宁市区一带出现暴雨空报,给部门应急联防联控、气象服务满意度带来了不利影响。因此有必要对该过程进行深入分析,从中尺度系统的演变出发,探究对流触发、维持和衰减机制,以加深对南宁地区中小尺度天气科学规律的认识,为提高短时临近预报准确率、提升城市气象保障服务能力提供科学依据。

1 资 料

本文采用的资料包括:(1)常规高空观测资料;(2)广西全区89个国家站、2821个区域站间隔1 h的地面观测资料;(3)南宁SA型新一代天气雷达间隔6 min的观测资料;(4)欧洲数值预报中心间隔1 h、空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的第五代全球再分析资料(ERA5)。

2 过程概况

2.1 天气实况

2022年6月12日20时至13日20时(北京时,下同),广西有17个国家级气象观测站出现暴雨到大暴雨(图略),远超广西区域性暴雨标准(10个站),接近全区性暴雨标准(20个站)(《广西天气预

报技术和方法》编写组,2012)。其中13日08—20时,广西东部出现强降水(图1a),最大累计降水量达到119.9 mm(防城那梭站),期间南宁市区只出现0~0.3 mm的微量降水,形成了雨带里的“空洞”,主观预报出现暴雨空报(图1b)。

从逐小时降水量分布可见(图略),12日20时至13日08时,雨带自广西西北部向东南方向移近南宁市区北侧至东侧;13日08—11时南宁市区北侧雨带少动,而其东侧雨带逐步东南移;11—15时南宁市区出现微弱降水,逐小时降水量仅为0~0.2 mm。

2.2 环流形势

12日20时,广西上空环流形势具备典型前汛期强降水环流特征(图略),200 hPa上南亚高压中心位于云南西部,广西处于南亚高压脊东侧的扇形辐散场中;500 hPa上亚洲中高纬环流形势呈“两槽一脊”型,低压槽分别位于巴尔喀什湖及内蒙古东北部,其中内蒙古低压槽伸至广西西北侧,副热带高压(以下简称副高)呈方头状伸向中南半岛东岸,脊线位于 18°N 附近,广西位于副高北侧;850 hPa及925 hPa切变线位于黔桂交界一带,切变线南侧有西南或偏南气流的辐合,为广西上空输送了水汽和不稳定能量;地面静止锋位于广西北部,是触发对流的主要天气系统。12日20时至13日08时,500 hPa副高东退,高空槽东移引导低层切变线及地面冷空气南下,造成广西中北部出现大到暴雨、局地大暴雨。13日08时(图2a),南宁市区位于500 hPa副高北侧、高空槽前,低空切变线南侧及850 hPa西南急流左侧,地面静止锋前侧。此后系统逐渐南移影响南宁市区(图略),上述环流形势有利于南宁市

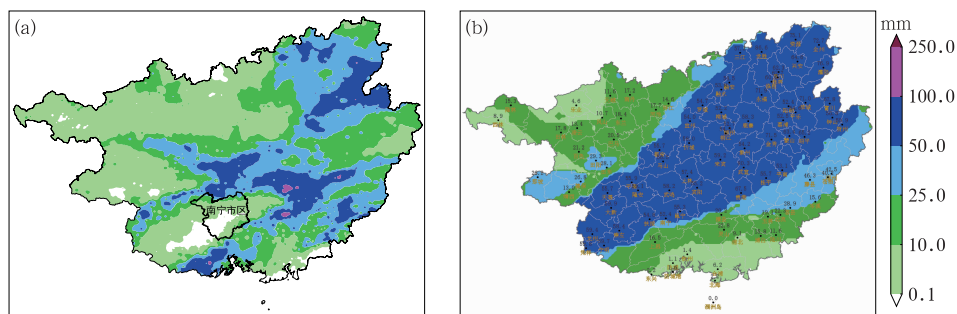


图1 2022年6月13日08—20时广西(a)累计降水量分布和(b)主观降水量预报
Fig.1 (a) Distribution of accumulated precipitation and (b) subjective precipitation forecast in Guangxi from 08:00 BT to 20:00 BT 13 June 2022

区出现降水天气。

2.3 对流潜势

13 日 08 时南宁探空显示(图 2b), 850 hPa 与 500 hPa 温差为 24°C 、K 指数为 42°C , 表明南宁市区处于层结不稳定状态; CAPE 值为 $2020.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 能量充足; 同时, 850 hPa、925 hPa 比湿分别达到 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 湿层深厚, 水汽条件较好; 此外, 抬升凝结高度仅为 219 m, 较弱的抬升条件即可触发对流; $0 \sim 6 \text{ km}$ 、 $0 \sim 3 \text{ km}$ 垂直风切变分别为 $11.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有利于对流系统的发展。总体而言, 不稳定层结、较大的 CAPE、充沛的水汽、适宜的垂直风切变, 有利于 13 日白天南宁市区出现以短时强降水为主的强对流天气。

2.4 雷达回波演变概况

13 日 08 时南宁雷达组合反射率因子显示(图 3a), 多个对流单体呈东西走向分布在南宁市区北侧及东侧, 单体质心低, 45 dBz 以上回波主要位于 5 km 以下(图 3b), 属低质心热带海洋型对流, 降水效率高,

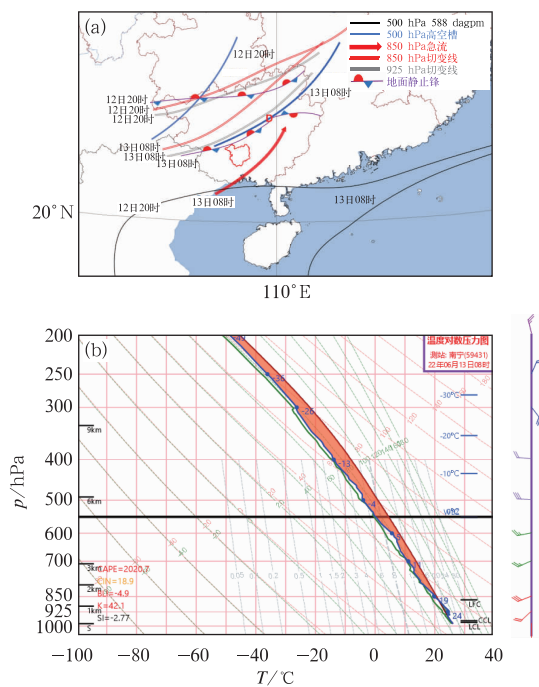


图 2 2022 年 6 月(a)12 日 20 时至 13 日 08 时天气形势示意图, (b)13 日 08 时南宁探空图
Fig. 2 (a) Schematic of synoptic situation from 20:00 BT 12 to 08:00 BT 13 and (b) T - $\ln p$ diagram at Nanning Station at 08:00 BT 13 June 2022

武鸣区宁武镇(距南宁市区北界仅 7 km)09 时出现 45.9 mm 的小时降水量。11 时(图 3c)北侧回波缓慢南移减弱, 东侧回波稳定向东南方向移动。午后, 在南宁市区东南边界处有回波新生并组织发展成较强线状回波, 横扫广西南部至沿海地区(图 3d), 可见回波带正好在南宁市区出现“空洞”。

综上分析可知, 此次过程为典型广西前汛期强降水环流形势, 南宁市区北侧出现短时强降水天气, 但过程期间南宁市区并未出现明显降水。为什么南宁市区北侧回波在南移过程中衰减? 而东侧回波在推进过程中强度维持? 为什么南宁市区南侧会有新生回波发展? 以下主要围绕这 3 个问题讨论此次暴雨空报事件的成因。

3 对流生消成因分析

3.1 天气尺度冷平流导致对流减弱

地面锋面、辐合线是本次过程中南宁市区上游暴雨天气的主要影响系统。一般认为, 天气系统需要维持一定的时间才能形成较大的降水量(朱乾根等, 2007), 而冷平流强度是影响锋面移动速度的关键因素之一。

13 日 08 时, 925 hPa 切变线位于南宁市区北侧附近, 呈西南—东北走向。据加密自动站资料计算得到逐小时相当位温, 发现锋区亦位于南宁市区北侧(图 4a), 锋区附近有地面辐合线(图 5a)。进一步沿 22.5°N 穿过南宁市区(108°E 附近)做温度平流的垂直剖面, 可见 08 时南宁市区上空 $1000 \sim 975 \text{ hPa}$ 为弱冷平流, 中心强度为 $-1.0 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, 南宁市区东侧 850 hPa 以下均为暖平流(图 4c)。11 时, 925 hPa 切变线西段快速南下进入南宁市区(图 4b), 市区上空冷平流进一步增强, 其上界延伸至 925 hPa 附近, 中心强度增大至 $-2.0 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4d), 冷平流增强、增厚, 使即将进入南宁市区的回波位于冷垫之上, 强度逐渐减弱。与此同时, 地面锋区快速南压至南宁市区南部和东部, 地面辐合线也位于南宁市区东南边界(图 5c), 导致触发的对流新生单体偏东、偏南, 南宁市区上空降水强度弱, 出现暴雨空报。

由此可见, 此次过程中南宁市区上空天气尺度冷平流加强, 促使锋面快速南移, 一方面使回波位于冷垫之上, 强度逐渐减弱, 另一方面由于锋面快速移

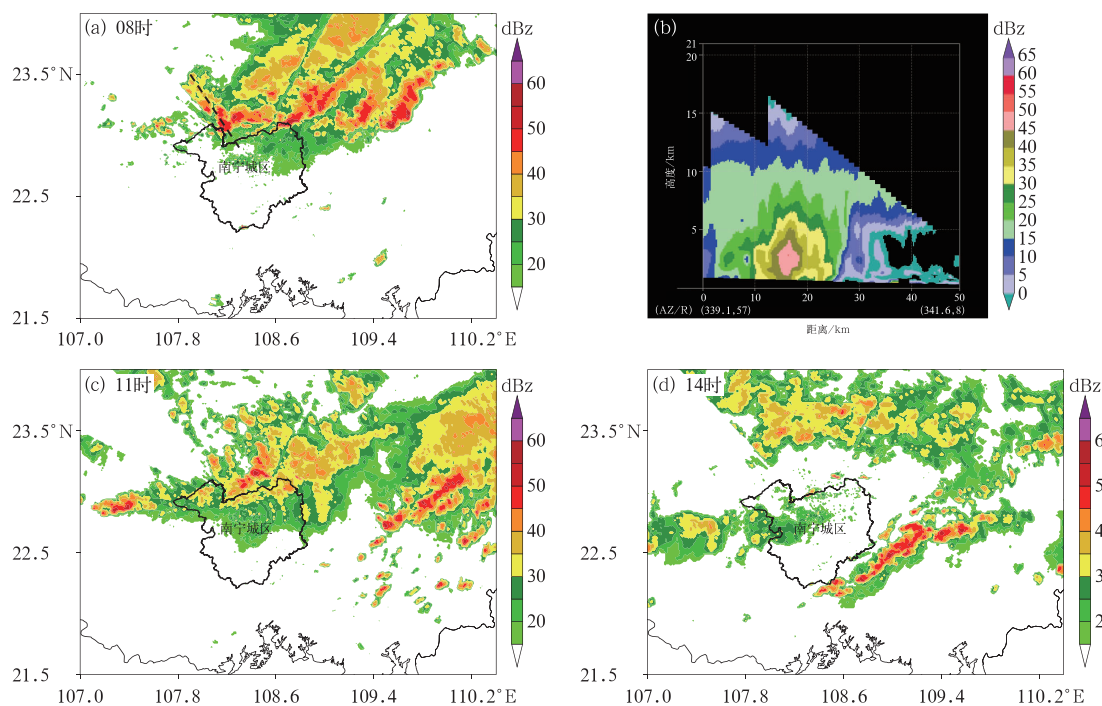


图3 2022年6月13日(a,c,d)南宁雷达组合反射率因子,(b)沿图3a黑色虚线的组合反射率因子垂直剖面
Fig. 3 (a, c, d) Composite reflectivity factor of Nanning Radar on 13 June 2022,
(b) cross-section of composite reflectivity factor along the black dashed line in Fig. 3a

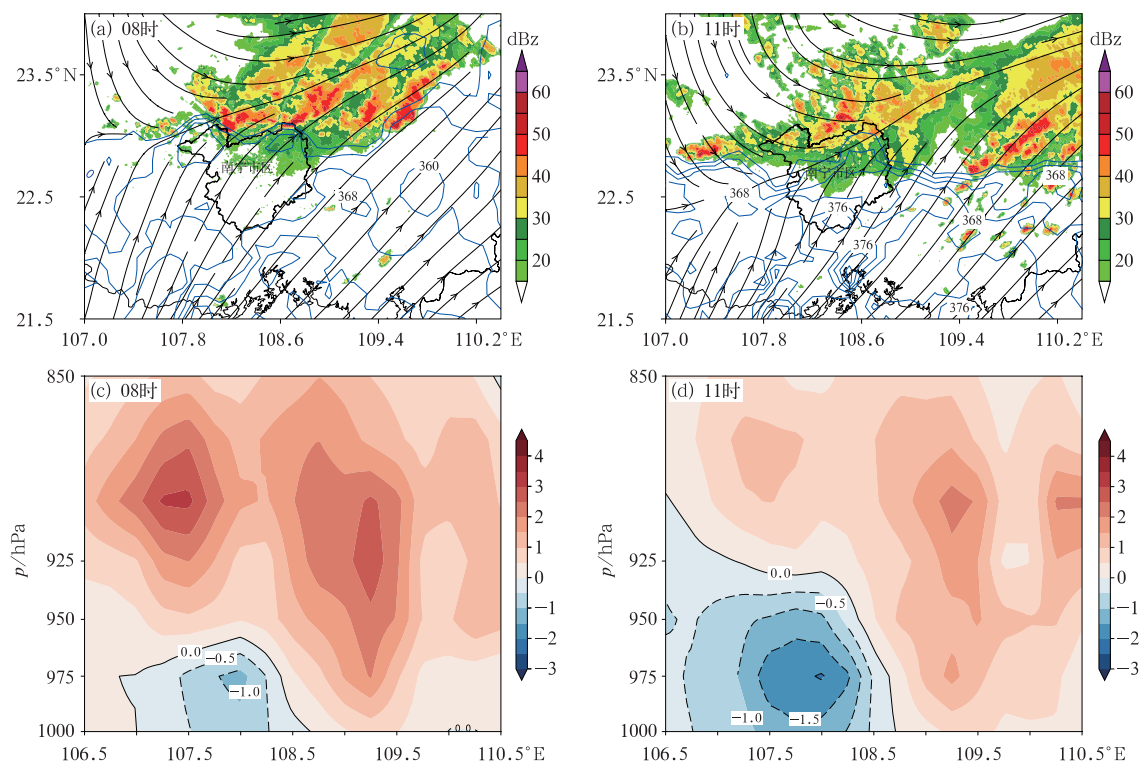


图4 2022年6月13日(a,b)925 hPa风场(流线)、南宁雷达组合反射率因子(填色)、地面相当位温(等值线,单位:K),
(c,d)温度平流(填色和等值线,单位: $10^{-4} \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$)沿22.5°N垂直剖面
Fig. 4 (a, b) Wind field at 925 hPa (streamline), composite reflectivity factor of Nanning Radar (colored)
and surface equivalent potential temperature (contour, unit: K), (c, d) cross-section of temperature
advection (colored and contour, unit: $10^{-4} \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$) along 22.5°N on 13 June 2022

过南宁市区,使触发的对流新生单体偏东、偏南,市区降水偏弱。

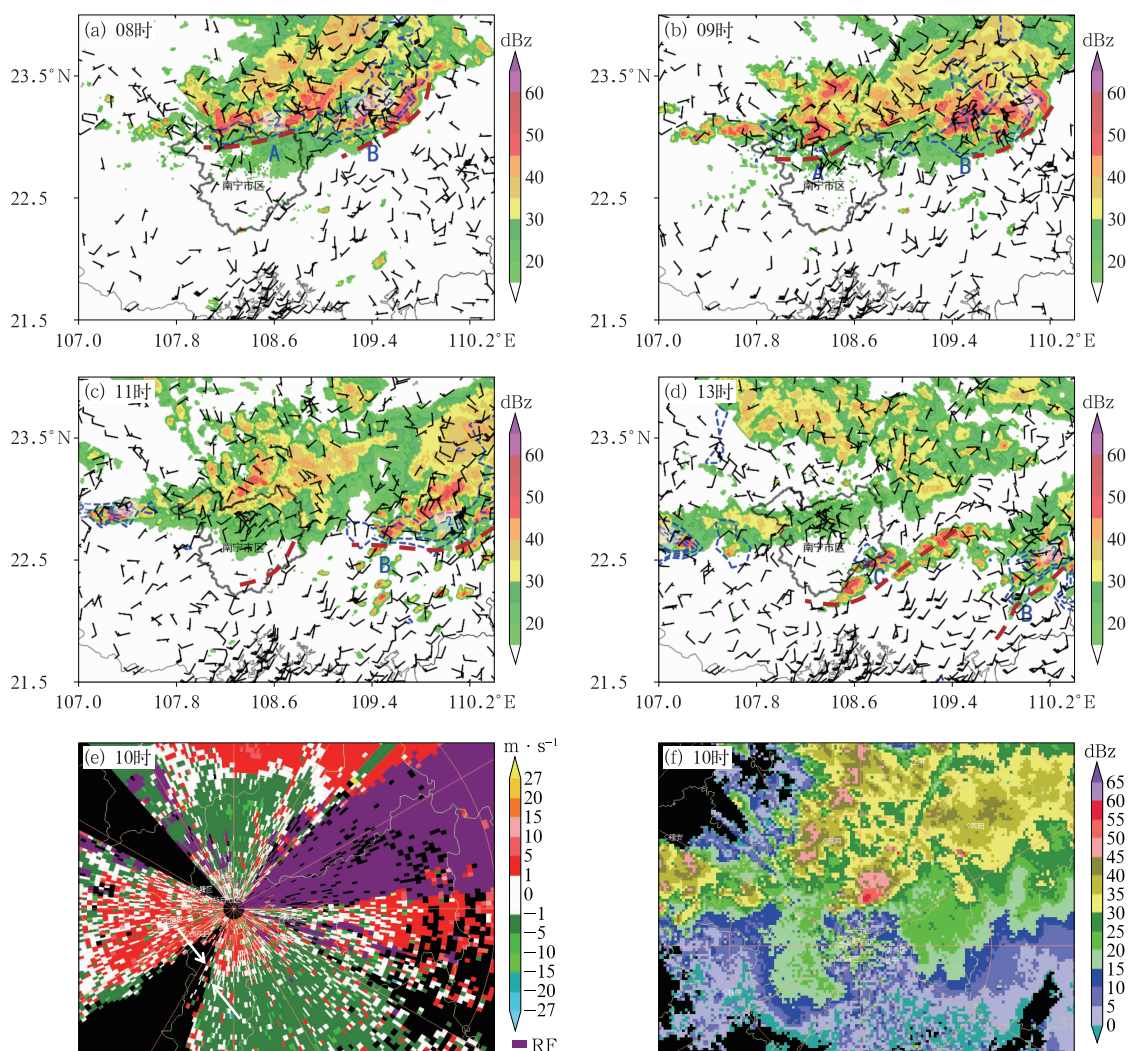
3.2 出流边界演变影响对流生消

暴雨天气过程的形成是中尺度雨团不断生成和移动的结果。强降水回波的发展和维持与冷池密切相关,在对流系统中,由于降水、蒸发、冷却,冷空气下沉并向前扩展,在对流下方近地面堆积形成冷池,风暴出流边界位于冷池前部,是对流内部下沉冷空气和近风暴环境暖空气的分界线。研究表明,出流边界作为主要的边界层辐合线类型之一,能够触发冷池前沿空气产生较强的上升运动,在对流风暴新

生及快速演变中起重要作用(Mueller and Carbone, 1987; Weckwerth and Parsons, 2006; 陈明轩和王迎春, 2012; 吴海英等, 2023)。

图5为1 h负变温、地面极大风场和南宁雷达组合反射率因子的分布。13日08时(图5a),强降水形成冷池,并分别在南宁市区北侧及东侧形成冷池中心A、B,其中冷池A中心变温幅度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,偏北风出流最大为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,冷池B中心变温幅度达到 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,冷池前沿的负等变温线密集,变温梯度大,西北风出流达到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

09时(图5b),冷池A及地面辐合线移至回波主体的前侧,表明出流边界开始远离母体风暴。结



注:图a~d中,棕色虚线表示地面辐合线,字母表示冷池;图e中箭头指示辐合线位置。

图5 2022年6月13日(a~d)地面1 h负变温(蓝色虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、极大风场(风羽)和南宁雷达组合反射率因子(填色),(e,f)南宁雷达(e)0.5°仰角径向速度、(f)组合反射率因子
Fig. 5 (a~d) Hourly surface negative temperature change (blue dashed contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), maximum wind (barb), composite reflectivity factor (colored), (e) 0.5° radial velocity and (f) composite reflectivity factor of Nanning Radar on 13 June 2022

合南宁雷达 0.5° 仰角径向速度产品也可见,10 时南宁雷达站以南地区转为偏北风(图 5e),并且在雷达南侧 12 km 处有径向速度辐合(图 5e 箭头),与地面辐合线对应,而此时回波主体仍位于雷达北侧(图 5f),进一步说明冷池 A 的出流边界此时已远离风暴母体。根据观测研究(陈明轩等,2017;肖现等,2013),冷池出流边界逐渐远离风暴母体,且回波前侧为稳定区时,远离的出流边界会切断风暴前侧的低层暖湿空气供应,也会破坏风暴前沿的辐合上升运动,预示着风暴会减弱分裂甚至消散。从图 5b 还可以看到,冷池 B 在向前推进的过程中,地面辐合线始终位于回波前沿,西北风出流增大至 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。冷池出流增强了对边界层暖湿气流的动力强迫抬升作用,同时也增强了低层垂直风切变,有利于对流发展加强,并逐步组织化。

10—11 时,位于南宁市区北侧附近的回波在缓慢南压的过程中逐步减弱消散(图 5c);而冷池 B 附近的辐合线始终紧贴母体风暴东南侧,具备较有利的抬升触发条件,使得沿出流边界附近不断有对流单体新生和增强,风暴在前进过程中强度维持,带来短时强降水天气,期间最大雨强达 $68.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

12 时起,南宁市区东南边界的地面辐合线处开始出现分散性回波,13 时回波逐步发展、合并,冷池 C 形成(图 5d),地面辐合线维持在风暴母体前侧,使得风暴母体前侧不断有回波触发,并逐步组织发展成线状回波。

综上所述可知,在天气尺度冷平流及雷暴冷池的共同影响下,冷空气快速移过南宁市区,南宁市区北侧风暴形成的出流边界逐渐远离风暴母体,导致风暴前侧的暖湿气流供应被切断,上升气流受到抑制,回波南移进入南宁市区的过程中减弱消散。区域数值模式未能预报出出流边界远离导致的市区回波衰减,是此次暴雨空报的主要原因。南宁市区东侧及南侧风暴向前推进的过程中出流边界紧贴回波前沿,维持较好的触发抬升条件,有利于风暴前侧不断新生对流。

3.3 水汽条件

水汽条件是雷暴生成的基本条件之一。925 hPa 风场上可以看到,08 时(图 6a)广西南部盛行西南气流,其中南宁市区北侧回波前方西南风速为 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;东侧回波前方为西南风速大值区,最大达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,强盛的低层暖湿气流有利于对流系统的

发展。11 时(图 6b),北侧回波前方西南风速减小至 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明暖湿供应减弱,不利于回波的发展及维持;东侧回波前方维持西南急流,配合地面辐合线有利于在母体风暴前侧不断触发对流。同时,南宁市区东南边界西南风速辐合维持,高温高湿有利于 CAPE 增强或重建(图 6c)。

从 1000 hPa 水汽通量及水汽通量散度分布可见,13 日 08 时(图 6d)南宁市区东侧回波前方为水汽通量辐合大值区,回波传播方向(东南方向)与水汽通量辐合大值带(西南—东北走向)在回波带的东南侧相交。孙继松等(2014)研究表明,在多单体风暴系统传播方向与水汽通量辐合带的交叉区域内,暖湿水汽供应充足,对雷暴单体的新生发展有利。结合图 6d 和 6e,08—11 时在上述有利区域内,即南宁市区东侧回波前方持续有雷暴单体新生发展;而南宁市区北侧回波前部持续水汽通量辐散,使得近地层水汽入流不足,不利于新生单体的发展,造成回波带传播速度缓慢,强度逐渐减弱。12 时(图 6f),南宁市区东南边界出现水汽通量辐合中心,强度达到 $-15 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于回波生成并不断发展、合并。

综上所述可知,低层水汽条件是对流系统不同演变特征的影响因子之一。由于低层水汽输送偏东,不利于南宁市区北侧回波前侧新生单体的发展,使得母体风暴强度逐渐减弱,从而降水减弱;而东侧回波受到稳定的西南暖湿气流影响,持续获得较好的水汽和不稳定能量,有利于在回波前侧不断有雷暴单体新生;南侧低层高温高湿,有利于 CAPE 的增强或重建。

3.4 环境热力和动力条件

从地面相当位温分布演变可以看到,13 日 08 时(图 4a)锋区位于回波主体前侧,11 时(图 4b)锋区自南宁市区北侧向南移动,逐渐远离回波主体并控制南宁市区大部,相当位温等值线分布稀疏;而东侧回波主体前侧一直维持有较强的相当位温锋区,具有较高的潜在不稳定;南宁市区东南边界处有相当位温大值中心(376 K),低层高温高湿有利于对流触发。

进一步讨论南宁市区北侧回波前方在垂直方向上热力、动力条件的演变,沿 108.3°E 垂直穿过南宁市区(23°N 附近)做相当位温、垂直环流和水平散度的垂直剖面。可以看到,13 日 08 时,南宁市区附近

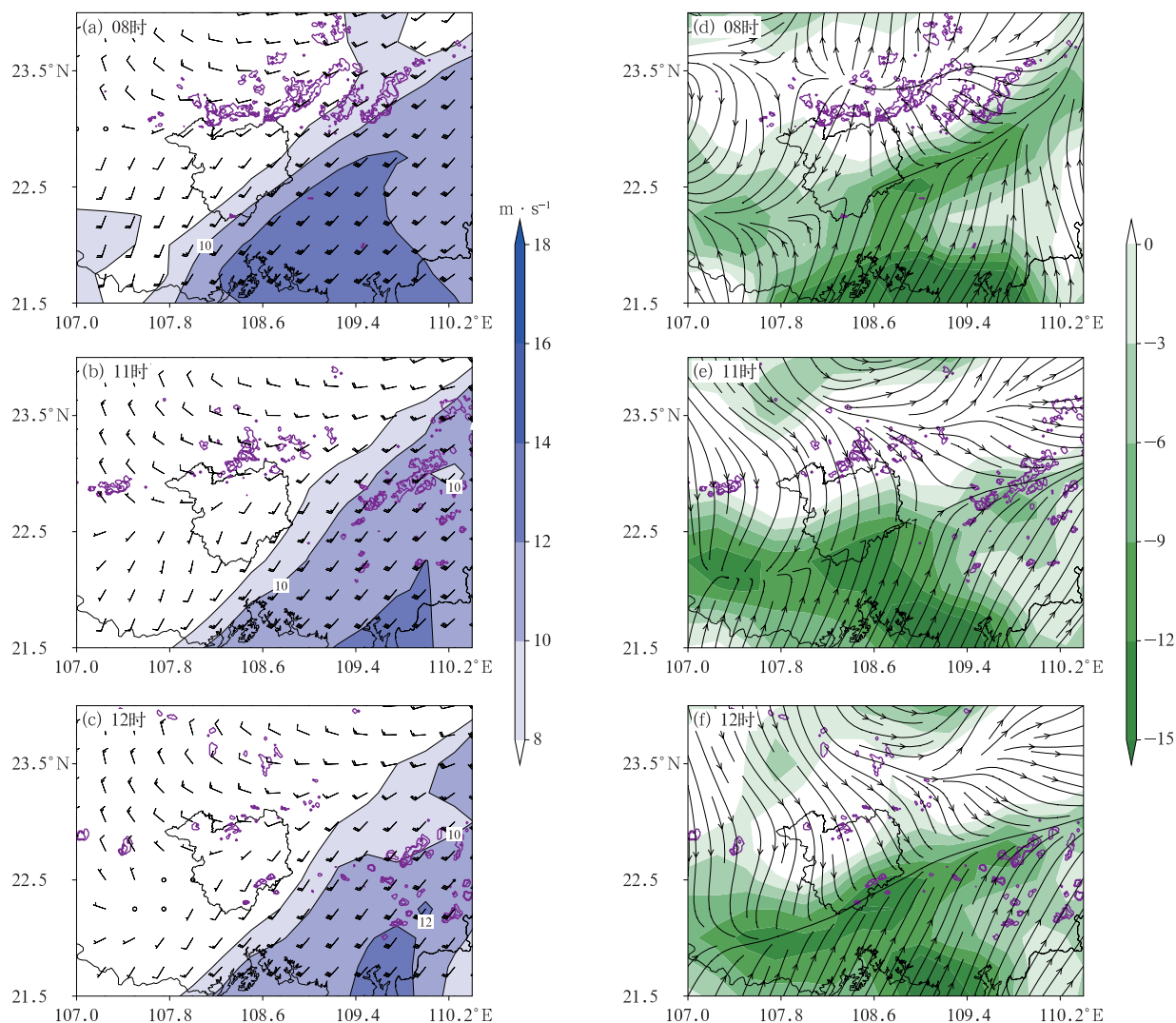


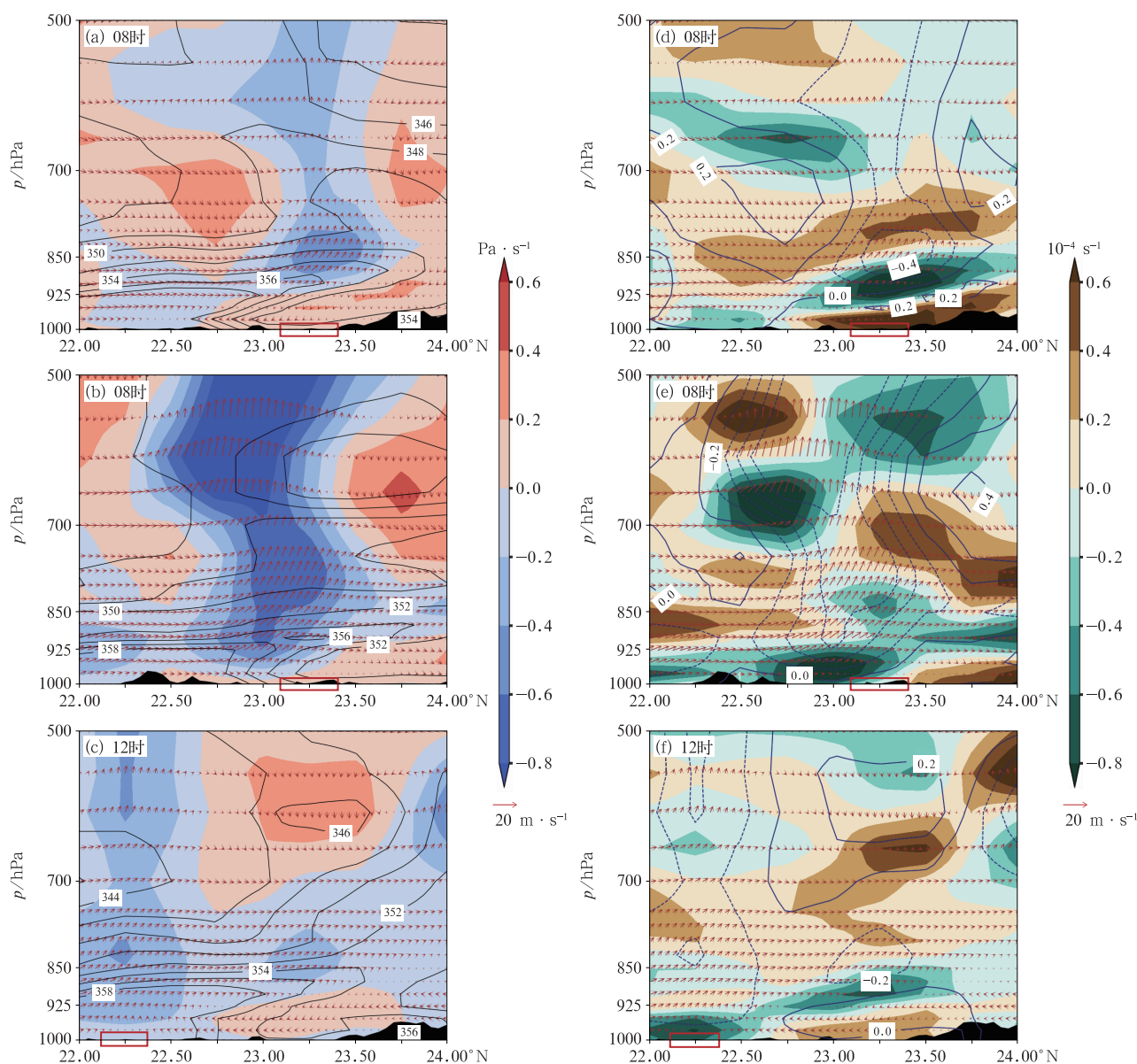
图 6 2022 年 6 月 13 日 (a~c) 南宁雷达组合反射率因子 (紫色等值线, ≥ 40 dBZ)、925 hPa 风场 (风羽) 和风速 (填色和黑色等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (d~f) 南宁雷达组合反射率因子 (紫色等值线, ≥ 40 dBZ)、1000 hPa 水汽通量 (流线) 和水汽通量散度 (填色, 单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 (a~c) Composite reflectivity factor of Nanning Radar (purple contour, ≥ 40 dBZ), wind field (barb) and wind speed (colored and black contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa, (d~f) composite reflectivity factor of Nanning Radar (purple contour, ≥ 40 dBZ), 1000 hPa water vapor flux (streamline) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) on 13 June 2022

上空锋区倾斜度较大, 相当位温的大值区随高度向北倾斜伸展, 同时在 850 hPa 以下, 相当位温随高度升高, 由 352 K 上升至 358 K 左右, 表现为稳定层结; 低层垂直风速较小, 并且在回波前侧存在下沉运动 (图 7a)。散度场上 (图 7d) 近地层及 850 hPa 附近为辐散, 辐散下沉气流不利于回波移入后进一步发展。

沿南宁市区东侧回波 (109.6°E) 的垂直剖面可见, 13 日 08 时, 回波主体前侧 (23.0°N) 925 hPa 以

下相当位温随高度无明显变化, 925 hPa 以上出现相当位温随高度降低的不稳定层结, 结合前文分析可知, 南宁市区东侧回波前方持续有低层西南暖湿输送, 有利于层结不稳定进一步发展 (图 7b)。散度场上 (图 7e), 南宁市区东侧回波前侧 925 hPa 以下为辐合中心, 850~700 hPa 为辐散。低层辐合、中层辐散有利于上升运动发展, 500 hPa 以下均为较强的上升运动 (图 7b), 具备较好的动力抬升条件。



注:红色方框表示回波带所在位置。

图7 2022年6月13日(a,d)沿 108.3°E , (b,e)沿 109.6°E , (c,f)沿 108.3°E 的垂直剖面
(a~c)垂直速度(填色)、相当位温(等值线,单位:K)、 $v\omega$ (箭头, ω 放大100倍), (d~f)水平散度
(填色)、垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)、 $v\omega$ (箭头, ω 放大100倍)

Fig. 7 Cross-section along (a, d) 108.3°E , (b, e) 109.6°E and (c, f) 108.3°E on 13 June 2022
(a—c) vertical velocity (colored), equivalent potential temperature (contour, unit: K),
 $v\omega$ (arrow, ω enlarged 100 times), (d—f) horizontal divergence (colored),
vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$), $v\omega$ (arrow, ω enlarged 100 times)

在南宁市区南侧($22.0^{\circ}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$), 13日08时, 850 hPa以下相当位温等值线密集, 相当位温随高度上升由358 K下降至350 K左右, 垂直递减率大, 表明该区域上空存在较强的不稳定层结(图7a)。散度场上(图7d)925 hPa以下为辐合,

925~700 hPa为辐散, 有利于上升运动发展。12时700 hPa以下相当位温随高度升高由358 K下降至344 K左右, 层结不稳定性增强(图7c)。散度场上(图7f)低层辐合增强, 形成辐合中心, 500 hPa以下均表现为上升运动(图7c), 可见热力、动力条件非

常有利于回波的触发。

综上可知,位于南宁市区北部的回波前侧低层存在稳定层结、下沉及辐散气流,不利于回波移入南宁市区发展,导致降水较弱;东侧回波前方由地面至中层表现为深厚的上升运动,有利于回波的发展及雷暴单体的新生;南侧具有较强的不稳定层结、较好的上升运动,亦有利于回波的触发。

3.5 对流生消概念模型

综合分析,归纳本次暴雨空报事件的对流生消成因(图 8):受天气尺度冷平流及风暴冷池的共同作用,冷空气快速移过南宁市区,南宁市区北侧回波形成的出流边界逐渐远离风暴母体,导致风暴前侧的暖湿气流供应被切断,上升气流受到抑制,同时回波移动前方低层水汽输送偏东,大气层结稳定,有辐散和下沉运动,使得回波移入后进一步衰减消散。

南宁市区东侧回波下方冷池强盛,在推进过程中出流边界紧贴风暴母体,与前方暖湿气流维持较好的辐合抬升机制,回波前方低层西南急流维持,位于回波传播方向与水汽通量辐合带的交叉区域内,暖湿水汽供应充足,大气层结不稳定,配合辐合上升运动,使得沿出流边界附近不断有对流单体新生和增强,回波在前进过程中强度维持。

南宁市区南侧位于低层水汽通量辐合中心,大气不稳定性较强,上升运动发展,随着低层高温高湿不稳定环境的建立和增强,沿地面中尺度辐合线不断有回波单体新生、发展、合并组织化形成线状回波。

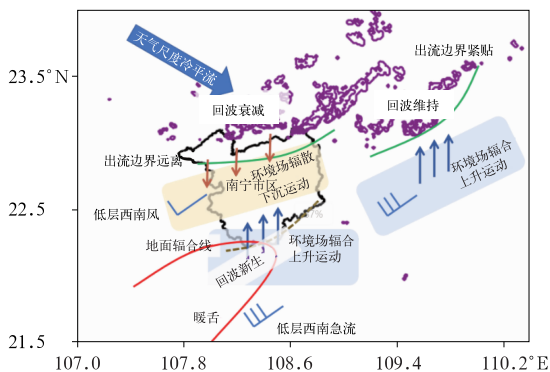


图 8 2022 年 6 月 13 日南宁市区暴雨空报事件对流生消成因概念模型

Fig. 8 Conceptual model of causes for the rainstorm false alarm event in Nanning Urban Area on 13 June 2022

4 预报偏差分析

对比分析各家数值模式对 6 月 13 日 08—20 时降水落区预报可以看到,CMA-GFS、ECMWF(以下简称 EC)等全球模式提前 24~48 h 时效均预报南宁市区有中到大雨天气,较实况雨量偏大(图略);中尺度模式提前 12 h 时效落区预报分歧较大(图略),其中 CMA-SH9 模式较为准确预报出南宁市区无明显降水,但未预报出南宁市区北侧的暴雨落区;CMA-MESO 模式预报出位于两条雨带间“空洞”的形态,但南部雨带位置较实况偏北,预报南宁市区局部有暴雨天气。上述预报偏差主要是由于地面冷空气影响时间与实况不一致。从 13 日 EC 和 CMA-MESO 模式 10 m 风场辐合线与实况对比可以发现(图 9),模式预报冷空气影响南宁的时间较实况偏晚:EC 模式预报冷空气 17 时后影响南宁市区;CMA-MESO 模式预报南宁市区 14 时受偏南风与西南风形成的辐合线影响,20 时前后开始受冷空气影响;而实况则为 11 时。由于模式预报冷空气午后才开始影响南宁,预报员考虑到前期南宁市区上空受低层较强偏南急流影响,水汽及热力条件好,加上午后地面加热,冷空气到达后将会出现强烈对流,区域模式也预报出了对流的生成,因此主观预报在 EC 模式预报基础上提高了降水量级,造成暴雨空报。

值得注意的是,EC 模式预报 13 日 08—11 时 925 hPa 西南急流逐渐减弱并东移(图 9),这在一定程度可提醒预报员,南宁市区暖湿条件将会转差,中尺度对流系统的触发和发展将会偏东,不利于南宁市区出现较强的对流性降水。

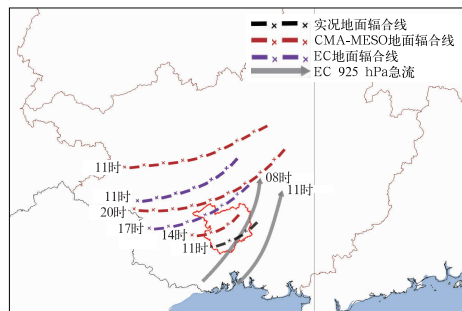


图 9 2022 年 6 月 13 日 EC、CMA-MESO 模式预报天气形势示意分析

Fig. 9 Schematic analysis of weather situation forecasted by EC and CMA-MESO on 13 June 2022

5 结论与讨论

本文对2022年广西“龙舟水”背景下,6月12日20时至13日20时南宁市区发生的一次暴雨空报成因进行了分析,得出主要结论如下:

(1)此次过程发生在高空槽东移引导低层切变线和地面冷空气南下的环流背景下,属于广西典型前汛期强降水环流形势,过程前期南宁市区水汽及热力条件充足,具备产生强降水的潜势,但是受到天气尺度冷平流及风暴冷池的共同作用,冷空气快速移过南宁市区,南宁市区北侧回波形成的出流边界逐渐远离风暴母体,导致风暴前侧的暖湿气流供应被切断,上升气流受到抑制,同时风暴移动前方低层水汽输送偏东,大气层结稳定,有辐散和下沉运动,使得回波移入后进一步衰减消散。

(2)南宁市区东侧回波下方冷池强盛,在推进过程中出流边界紧贴风暴母体,与前方暖湿气流维持较好的辐合抬升机制,回波前方低层西南急流维持,位于传播方向与水汽通量辐合带的交叉区域内,暖湿水汽供应充足,大气层结不稳定,有辐合上升运动,沿出流边界附近不断有对流单体新生和增强,回波在前进过程中强度维持。

(3)南宁市区南侧位于低层水汽通量辐合中心,大气不稳定性较强,上升运动发展,随着低层高温高湿空气累积,CAPE重建或增强,沿地面中尺度辐合线不断有回波单体新生、发展、合并组织化形成线状回波。

(4)此次暴雨空报事件发生在有利于出现强降水的天气尺度系统背景下,受天气尺度冷空气及中尺度风暴冷池强度、地面辐合线移动以及环境条件差异影响,相邻区域回波发生了迥异的演变特征。受限于模式预报能力及天气系统本身的不确定性等因素,提前24 h以上很难做出准确的定量预报,全球模式对环流形势趋势预报对暴雨消空的环境条件分析有一定的参考意义。后续在短期预报中将加强环境条件演变分析,并在临近预报中利用加密区域自动气象站数据分析地面冷池的移动和强度情况、出流边界演变及环境条件变化,对短时临近预报进行补充订正,同时还需运用高分辨率数值模拟试验手段进一步分析论证其具体的物理过程,不断完善本地客观预报技术。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,2012.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,70(3):371-386. Chen M X, Wang Y C, 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):371-386(in Chinese).
- 陈明轩,肖现,高峰,2017.出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J].大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5):897-917(in Chinese).
- 陈小婷,赵强,高宇星,等,2023.秦岭北麓两次下山雷暴不同演变特征分析[J].气象,49(8):932-945. Chen X T, Zhao Q, Gao Y X, et al, 2023. Evolution characteristics of two down-to-hill thunderstorms at the northern foot of Qinling Mountains[J]. Meteor Mon, 49(8):932-945(in Chinese).
- 崔新艳,陈明轩,秦睿,等,2021.对流初生机理的研究进展[J].气象,47(11):1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2021. Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon, 47(11):1297-1318(in Chinese).
- 高帆,俞小鼎,尹承美,等,2022.山东一次浅薄冷空气触发强降水过程的对流系统组织形态演变分析[J].气象,48(8):993-1006. Gao F, Yu X D, Yin C M, et al, 2022. Analysis on the evolution of convective system organization in a process of severe precipitation triggered by shallow cold air in Shandong[J]. Meteor Mon, 48(8):993-1006(in Chinese).
- 《广西天气预报技术和方法》编写组,2012.广西天气预报技术和方法[M].北京:气象出版社. Guangxi Weather Forecasting Technology and Method Writing Group, 2012. Weather Forecasting Techniques and Methods in Guangxi[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 何娜,俞小鼎,丁青兰,等,2023.北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的环境场特征分析[J].高原气象,42(5):1285-1297. He N, Yu X D, Ding Q L, et al, 2023. Analysis of environmental field characteristics of convective initiation triggered by thunderstorm gust fronts in Beijing Area[J]. Plateau Meteor, 42(5):1285-1297(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,陈明轩,等,2021.北京地区一次飑线的组织化过程及热动力结构特征[J].大气科学,45(2):287-299. Lei L, Sun J S, Chen M X, et al, 2021. Organization process and thermal dynamic structure of a squall line in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):287-299(in Chinese).
- 林良勋,吴乃庚,黄忠,等,2009.广东2008年罕见“龙舟水”特点及成因诊断分析[J].气象,35(4):43-50. Lin L X, Wu N G, Huang Z, et al, 2009. Causality analysis of the infrequent dragon-boat precipitation in Guangdong Province in 2008[J]. Meteor Mon, 35(4):43-50. (in Chinese).
- 梁岱云,黄丹萍,苏兆达,2023.2022年南宁市“龙舟水”暴雨期间模

- 式对比及订正技巧[J]. 气象研究与应用, 44(1): 51-56. Liang D Y, Huang D P, Su Z D, 2023. Comparative analysis of numerical models and revision techniques for the rainstorms in Nanning during the dragon-boat precipitation period in 2022[J]. J Meteor Res Appl, 44(1): 51-56(in Chinese).
- 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]. J Meteor Res Appl, 44(1): 7-13(in Chinese).
- 覃皓, 农孟松, 邱滋, 等, 2023. 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, 44(1): 20-25. Qin H, Nong M S, Qiu Z, et al, 2023. Diurnal variation mechanism of low-level jet during the dragon-boat warm-sector rainstorm process in 2022 in Guangxi[J]. J Meteor Res Appl, 44(1): 20-25(in Chinese).
- 孙继松, 戴建华, 何立富, 等, 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. The Basic Principle and Technical Method of Severe Convection Weather Forecast [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 吴海英, 孙继松, 慕瑞琪, 等, 2023. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析[J]. 气象学报, 81(2): 205-217. Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al, 2023. Analysis of extreme convective gusts caused by two types of weather storms during a strong convection event[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 205-217(in Chinese).
- 吴志伟, 江志红, 何金海, 2006. 近50年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析[J]. 大气科学, 30(3): 391-401. Wu Z W, Jiang Z H, He J H, 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years[J]. Chin J Atmos Sci, 30(3): 391-401(in Chinese).
- 伍红雨, 吴遥, 郑璟, 2024. 2022年华南极端“龙舟水”与大气环流及海温异常的关系[J]. 大气科学学报, 47(3): 450-459. Wu H Y, Wu Y, Zheng J, 2024. The relationship between extreme dragon-boat precipitation and atmospheric circulation and SST anomaly in South China in 2022[J]. Trans Atmos Sci, 47(3): 450-459(in Chinese).
- 肖现, 王迎春, 陈明轩, 等, 2013. 基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析[J]. 气象学报, 71(5): 797-816. Xiao X, Wang Y C, Chen M X, et al, 2013. A mechanism analysis of the thermo-dynamical field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing Area with the radar data 4DVar[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 797-816(in Chinese).
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorms and Severe Convection Approaching Forecast [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等, 2006. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 I. 划分日期的确定[J]. 大气科学, 30(6): 1207-1216. Zheng B, Liang J Y, Lin A L, et al, 2006. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part I: determination of the division dates[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6): 1207-1216(in Chinese).
- 章翠红, 夏茹姊, 王咏青, 2018. 地形、冷池流出和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. 大气科学学报, 41(2): 207-219. Zhang C H, Xia R D, Wang Y Q, 2018. Observational analysis of a local heavy rainfall in Beijing caused by terrain, cold pool outflow and warm moist air interactions[J]. Trans Atmos Sci, 41(2): 207-219(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理与方法: 第4版[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principles and Methods of Weather [M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Doswell III C A, 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: a case study example [J]. Wea Forecasting, 2(1): 3-16.
- Moncrieff M W, Miller M J, 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 102(432): 373-394.
- Mueller C K, Carbone R E, 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow[J]. J Atmos Sci, 44(15): 1879-1898.
- Weckwerth T M, Parsons D B, 2006. A review of convection initiation and motivation for IHOP_2002[J]. Mon Wea Rev, 134(1): 5-22.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al, 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(10): 2079-2100.
- Wilson J W, Megenhardt D L, 1997. Thunderstorm initiation, organization and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 127(7): 1507-1525.
- Wilson J W, Mueller C K, 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution[J]. Wea Forecasting, 8(1): 113-131.
- Wilson J W, Roberts R D, 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective[J]. Mon Wea Rev, 134(1): 23-47.
- Wilson J W, Schreiber W E, 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 114(12): 2516-2536.

(本文责编: 张芳)