

基于多源观测资料的芜湖“7·19”短时暴雨过程分析

范德民¹, 戴文欣¹, 张寻梦², 章舒³, 束梓健¹

¹芜湖市湾沚区气象局, 安徽 芜湖

²芜湖市气象服务中心(安徽气象博物馆), 安徽 芜湖

³无为市气象局, 安徽 芜湖

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月29日

摘要

2023年7月19日, 安徽芜湖出现一次局地极端短时强降水过程, 最大小时雨强达101 mm。利用常规观测、FY-4A卫星、S波段和X波段雷达及ERA5再分析资料, 对此次过程的环流背景、中尺度系统演变及热动力结构进行了综合分析。结果表明: 此次过程发生在副热带高压边缘高温高湿环境下, 高空辐散与低层辐合形成良好垂直耦合, 北方冷空气南下触发层结不稳定发展。多个中尺度对流系统(MCS)在发展和合并过程中组织化增强, 强降水主要位于TBB低值中心及梯度较大区域。地面“对头风”结构导致近地层暖湿气流强烈辐合, 对流系统表现出高质心、中等垂直风切变特征。热动力结构分析表明, 低层湿不稳定层结、干冷空气嵌入及正涡度柱发展共同促进了强上升运动和不稳定能量释放, 最终导致极端短时强降水发生。研究表明, 在高湿厚暖云背景下, 即使缺乏典型低空急流条件, MCS合并及边界层辐合仍可造成局地极端短时强降水。

关键词

短时强降水, 中尺度对流系统, 天气雷达, 热动力结构, 芜湖

Analysis of the “7·19” Short-Duration Heavy Rainfall Event in Wuhu Based on Multi-Source Observational Data

Demin Fan¹, Wenxin Dai¹, Xunmeng Zhang², Shu Zhang³, Zijian Shu¹

¹Wanzhi District Meteorological Bureau, Wuhu Anhui

²Wuhu Meteorological Service Center (Anhui Meteorological Museum), Wuhu Anhui

³Wuwei Meteorological Bureau, Wuhu Anhui

Received: June 25, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 29, 2026

文章引用: 范德民, 戴文欣, 张寻梦, 章舒, 束梓健. 基于多源观测资料的芜湖“7·19”短时暴雨过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(4): 850-860. DOI: 10.12677/ccrl.2026.154090

Abstract

On 19 July 2023, an extreme short-duration heavy rainfall event occurred in Wuhu, Anhui Province, with a maximum hourly precipitation of 101 mm. Using conventional observations, FY-4A satellite data, S-band and X-band radar data, and ERA5 reanalysis data, the synoptic background, mesoscale system evolution, and thermodynamic and dynamic structures of this event were comprehensively analyzed. The results show that the event occurred under a hot and humid environment at the edge of the subtropical high, where upper-level divergence and low-level convergence formed a favorable vertical coupling structure, while the southward intrusion of cold air enhanced atmospheric instability. Multiple mesoscale convective systems (MCSs) developed and merged, leading to enhanced convective organization, and the heavy rainfall was mainly located in regions with low TBB centers and large TBB gradients. A surface head-on wind pattern caused strong low-level moisture convergence, and the convective system exhibited characteristics of a high echo centroid and moderate vertical wind shear. Thermodynamic and dynamic analyses indicate that the combined effects of low-level moist instability, dry and cold air intrusion, and the development of a positive vorticity column promoted strong upward motion and the release of unstable energy, ultimately resulting in the extreme short-duration heavy rainfall. The study suggests that under conditions of high humidity and deep warm clouds, extreme short-duration heavy rainfall can still occur through MCS merging and boundary-layer convergence even without a typical low-level jet.

Keywords

Short-Duration Heavy Rainfall, Mesoscale Convective System, Weather Radar, Thermodynamic and Dynamic Structure, Wuhu

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

暴雨是重要的灾害性天气之一，常引发内涝、洪水、泥石流等次生灾害，对人民生命财产安全及社会经济发展造成严重影响，因此其预报预警一直是气象业务与科研关注的重点。已有研究表明，暴雨通常发生在有利的大尺度环流背景和适宜的环境条件共同作用下，其中低空急流和超低空急流在水汽输送和不稳定能量维持中发挥关键作用[1][2]。暴雨的形成是多尺度系统相互作用的结果，中尺度对流系统往往是直接造成强降水的主要影响系统[3]-[6]。同时，边界层辐合线、雷暴冷池出流以及低层暖湿气流对对流的触发与发展具有重要作用[7]-[9]，“后向传播”机制有助于强降水的维持与增强[10]。此外，对流云团的合并可使系统尺度扩大、回波增强、移动减慢，从而显著增强降水强度[11]-[15]，强降水往往出现在TBB等值线梯度较大的区域[16]。

芜湖市位于安徽省东南部，地处长江中下游地区，毗邻长江，地势总体平坦且河网密布。受亚热带季风气候影响，夏季高温高湿、水汽条件充沛，具备发生短时强降水的有利背景。在强降水突发性强、雨强大的情况下，城市排水系统往往难以及时响应，容易引发城市内涝及交通受阻，对城市运行和社会生产生活造成较大影响。

2023年7月19日，芜湖市出现一次短时强降水过程，局地达到大暴雨量级。全市累计降水量超过100 mm的站点有6个，其中最大小时雨强达101 mm(芜湖沈巷站19~20时)，湾沚周皋站最大小时雨强

为 87.9 mm。此次过程具有突发性强、局地性明显、小时雨强极端等特征，对当地造成了较为严重的影响。然而，在本次过程中，省、市级主观预报及数值模式均未能准确把握降水强度及落区，是一次具有代表性的预报偏差案例。

基于此，有必要对该次强降水过程开展深入分析。本文拟利用多源高时空分辨率观测资料，包括地面自动站风场与降水资料、天气雷达回波等，对“7·19”短时暴雨过程雷暴系统的触发与演变进行综合研究，从环流背景、中尺度系统特征及热动力条件等方面分析其发生发展机制，重点探讨边界层辐合线、冷池出流及低层暖湿气流等关键因子在对流触发与增强过程中的作用，以期为类似强降水过程的预报提供参考依据。

2. 天气实况和环流背景

2.1. 天气实况

2023 年 7 月 19 日下午至 20 日 02 时，芜湖市出现一次明显降水过程，全市平均降水量为 34.2 mm。其中，市区平均 40.6 mm，湾沚区平均 70.9 mm，繁昌区平均 37.7 mm，无为市平均 27.8 mm，南陵县平均 21.6 mm。降水主要集中在 19 日 18~20 时，为本次过程的短时强降水最强时段，最大小时雨强达 101 mm（芜湖沈巷站 19~20 时）（图 1）。

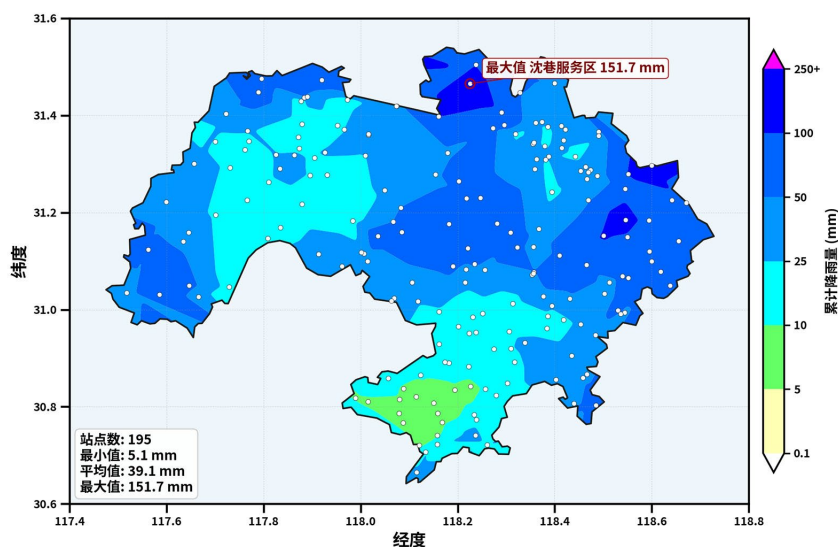


Figure 1. Precipitation from 17:00 on July 19, 2023 to 02:00 on July 20, 2023 (unit: mm)

图 1. 2023 年 7 月 19 日 17 时~20 日 02 时降水量(单位: mm)

从累计降水分布来看，过程累计降水量超过 100 mm 的站点有 6 个，超过 50 mm 的站点有 49 个。空间分布上，降水总体呈现“东北多、西南少”的特征，强降水主要集中在湾沚及市区一带。

2.2. 环流背景

为进一步揭示此次短时强降水的发生背景及其动力成因，对暴雨发生前后的大尺度环流形势进行分析。2023 年 7 月 19 日 08 时，200 hPa 高空在河南北部存在一支风速为 30~35 m/s 的高空急流；至 20 时，高空急流明显加强并向东扩展，影响范围由陕西南部经河南、山西、河北延伸至山东及渤海一带，急流核中心风速增至 40 m/s。湾沚区位于高空急流右侧分流区，有利于形成较强的高空辐散，为对流发展提供良好的高层出流条件。

500 hPa 形势显示(如图 2), 中高纬 60°N 附近存在一条横槽, 其槽底有短波槽分裂并东移。横槽前部风场与温度场夹角较大, 冷平流明显, 北方冷空气沿西北路径南下, 逐步影响我国中东部地区。08 时, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)脊线位于 110°E、25°N 附近(图 2(a)), 芜湖处于副高控制之下; 至 20 时, 副高有所西伸, 但受北方冷空气影响, 其位置略有南压(图 2(b)), 芜湖转为位于副高边缘区域。

850 hPa 上, 08 时安徽中部存在一条东西向暖式切变线(图 2(c)), 为低层辐合提供有利条件; 至 20 时, 安徽地区风场逐渐演变为气旋式结构, 低层辐合进一步加强, 有利于对流系统的维持和发展。

综合各层环流配置来看, 此次暴雨过程发生时, 芜湖位于副高边缘, 高温高湿环境为对流提供充足的水汽与能量条件; 高层(200 hPa)强辐散与低层(850 hPa)辐合形成良好的垂直耦合结构, 同时 500 hPa 北方冷空气南下触发不稳定层结, 使副高边缘暖湿气流被激发并发展为强对流天气, 最终导致此次短时强降水过程的发生。

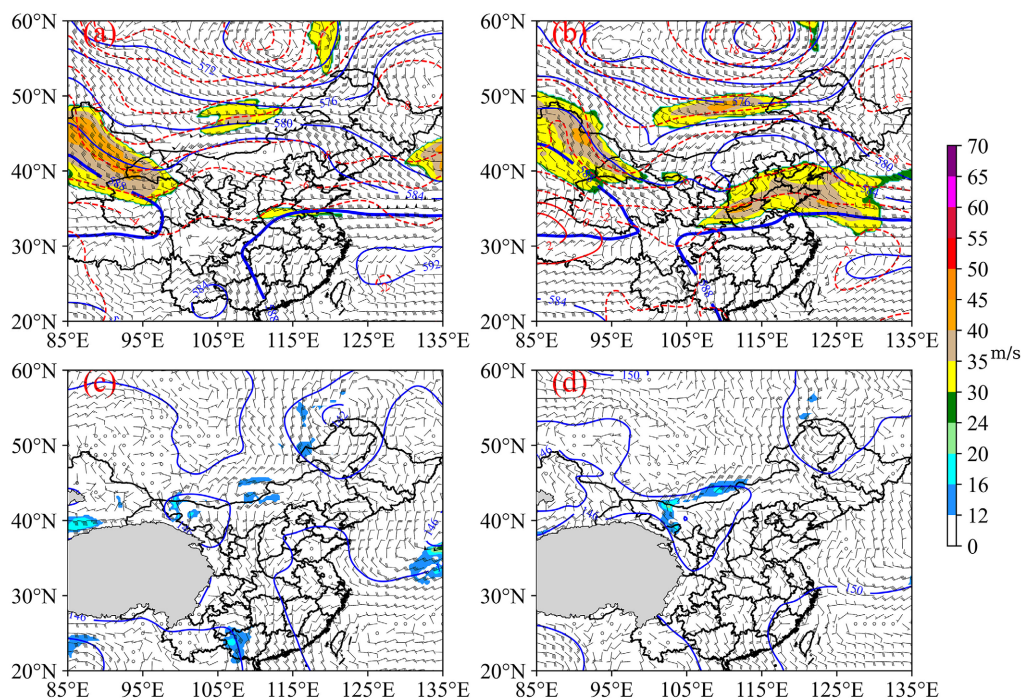


Figure 2. 500 hPa height and wind field on July 19th (a) at 08:00, (b) at 14:00; 850 hPa height and wind field (c) 08:00, (d) 14:00 (the color spots in a and b are 200 hPa upper jet, the color spots in c and d are 850 hPa lower jet, and the gray shadow is Xizang terrain)

图 2. 7 月 19 日 500 hPa 高度和风场(a) 08:00、(b) 14:00; 850 hPa 高度和风场(c) 08:00、(d) 14:00 (a、b 中色斑为 200 hPa 高空急流, c、d 中色斑为 850 hPa 低空急流, 灰色阴影为西藏地形)

从暴雨区附近安庆和南京 7 月 19 日探空资料(见表 1)可以看出, 强降水发生当日均存在一定的对流有效位能(CAPE), 抬升指数(LI)和沙氏指数(SI)均为负值, 表明大气层结处于不稳定状态, 有利于对流发展。从垂直风切变来看, 除南京 20 时为中等强度外, 其余时次和站点均表现为弱垂直风切变环境, 整体上更有利于短时强降水的产生而非组织性强对流系统的发展。

选取强降水发生前的安庆站 7 月 19 日 08 时探空 T-logP 图(图 3)进行分析可以发现, CAPE 呈现“狭长型”结构, 虽数值不算极端, 但具备一定的不稳定能量储备。该类型 CAPE 形态表明大气温度廓线接近湿绝热线, 通常对应较高的降水效率[17], 有利于降水向强度集中型发展。

Table 1. Sounding data from Anqin and Nanjing on July 27th
表 1. 7 月 27 日安庆和南京探空资料

探空物理量参数	安庆		南京	
	08:00	20:00	08:00	20:00
CAPE/(J/kg)	1518.3	533.1	1108.8	723.4
LI	-2.8	-2.86	-3.28	-2.08
SI	-1.97	-1.84	-1.67	-0.7
K 指数	39.1	40.7	39	39.8
0~3 km 垂直风切变/(m/s)	2.1	10.7	8.2	5.4
0~6 km 垂直风切变/(m/s)	4.8	13.6	10	16.6
暖云层高度/m	5188	4773	4867	4958

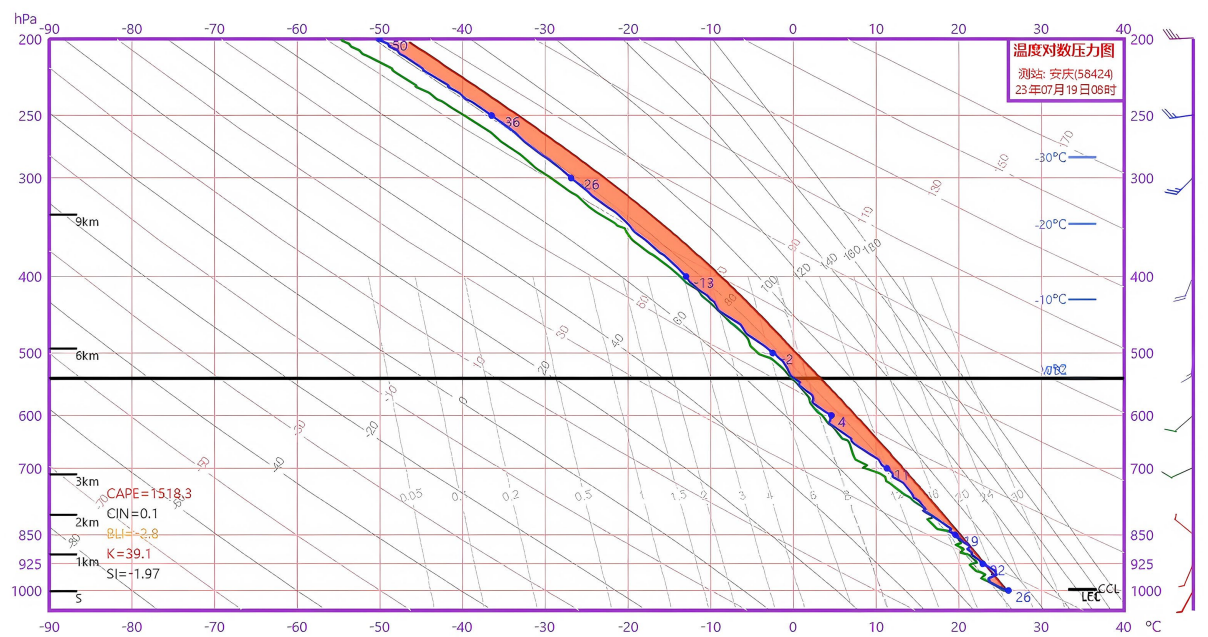


Figure 3. T-logP image of Anqing sounding at 08:00 on July 19th
图 3. 7 月 19 日 08 时安庆探空 T-logP 图

从水汽条件来看，850 hPa 以上以偏南风为主，说明低层至中层存在持续的暖湿气流输送；整层大气相对湿度较高，其中 925 hPa 比湿达 17.01 g/kg，850 hPa 为 15.06 g/kg，700 hPa 仍有 10.34 g/kg，表明水汽条件十分充沛。同时，暖云层厚度达 5188 m，有利于云滴充分碰并增长，提高降水效率。这种“湿厚暖云”的结构是短时强降水形成的重要有利条件。本次暴雨过程未观测到典型低空急流的显著参与，说明在整层水汽充沛、层结不稳定且降水效率较高的背景下，即使缺乏明显的低空急流输送，也可产生短时强降水过程。

3. 中尺度系统演变特征分析

3.1. 中尺度雨团与卫星云图 TBB 分析

基于 FY-4A 红外卫星资料对云系演变过程进行分析，可以较直观反映中尺度对流系统(MCS)的发展

及相互作用特征。结果表明,此次暴雨过程主要由多个 MCS 相互作用并逐步合并发展所致。为进一步分析其演变特征及与强降水的对应关系,本文结合加密自动站逐小时降水资料(≥ 1 mm)及逐时 TBB 资料,对主要对流系统的时空演变进行对比分析。

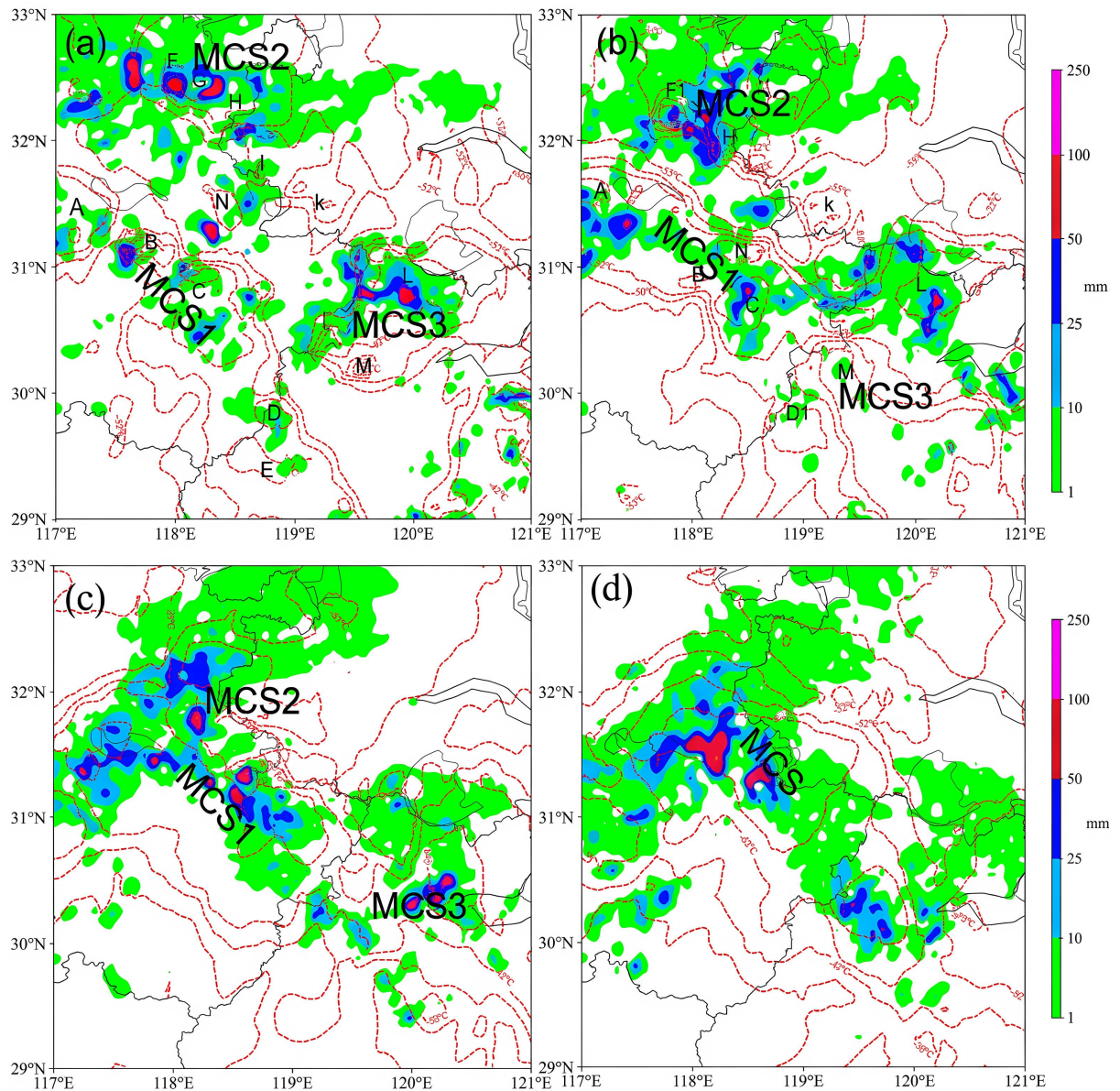


Figure 4. July 19, 2023 (a) 16:30; (b) 17:30; (c) 18:30; (d) 19:30 Fengyun Satellite TBB and (a) 17:00; (b) 18:00; (c) 19:00; (d) 20:00 1-hour rainfall distribution map (The black line represents TBB, unit: $^{\circ}\text{C}$)

图 4. 2023 年 7 月 19 日(a) 16:30; (b) 17:30; (c) 18:30; (d) 19:30 风云卫星 TBB 与(a) 17:00; (b) 18:00; (c) 19:00; (d) 20:00 1 h 雨量分布图 (黑色线条为 TBB, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

19 日 16:30 (图 4(a))前后, 芜湖西部存在一条西北 - 东南向 α 中尺度对流系统(MCS1), 由云团 A、B、C、D 和 E 组成, 在 TBB 等值线密集区附近出现小时雨强大于 10 mm 的降水; 滁州一带为 β 中尺度对流系统(MCS2), 其内部多个强对流中心对应小时雨强超过 50 mm; 江苏地区另有 β 中尺度对流系统(MCS3)发展。同时, MCS1 与 MCS2 之间触发生成中尺度云团 N, 芜湖处于多个 MCS 相互作用的过渡

区域。随后至 17:30 (图 4(b)), MCS1 东移并与云团 N 合并增强, 中心 TBB 降至 -70°C 以下, MCS2 南压并向其靠近, MCS3 范围继续扩大, 但湾沚区尚未出现明显降水。

18:30~19:30 (图 4(c)、图 4(d)), MCS1 与 MCS2 率先发生合并, 并进一步与 MCS3 相互作用, 最终形成尺度更大的椭圆形中尺度对流系统(MCS4)。在系统合并增强阶段, 湾沚北侧出现 TBB 低于 -80°C 的强对流核心区, 对应小时雨强超过 50 mm, 湾沚国家站出现 39.5 mm 短时强降水; 19~20 时芜湖沈巷站最大小时雨强达 101 mm, 为本次过程极值。总体来看, 强降水主要出现在 TBB 等值线密集及梯度较大的区域, 且在多个 MCS 合并增强阶段达到峰值, 表明系统尺度扩展与对流组织化增强是本次短时强降水发生发展的关键机制。

3.2. 地面风场和雷达回波分析

基于地面风场与雷达回波资料, 对此次强对流的触发与演变过程进行分析。19 日上午, 淮北地区自西向东出现强对流天气, 午后强对流回波在江淮之间持续发展并逐渐东移。14 时以后, 池州至黄山一带形成一条西北至东南向强对流回波带并向东影响芜湖地区, 同时南京和马鞍山一带亦有对流回波发展增强。17 时前后, 芜湖市东侧为偏东风、西侧为偏西风, 地面风场呈明显“对头风”特征, 导致近地层水汽强烈辐合, 为对流触发与发展提供有利动力条件。在此背景下, 回波逐渐演变为“人”字形结构(图 5(a)), 18 时左右与东侧新生对流单体合并增强, 出现 50 dBZ 以上强回波(图 5(b)), 18~19 时湾沚周皋站小时雨强达 87.9 mm。

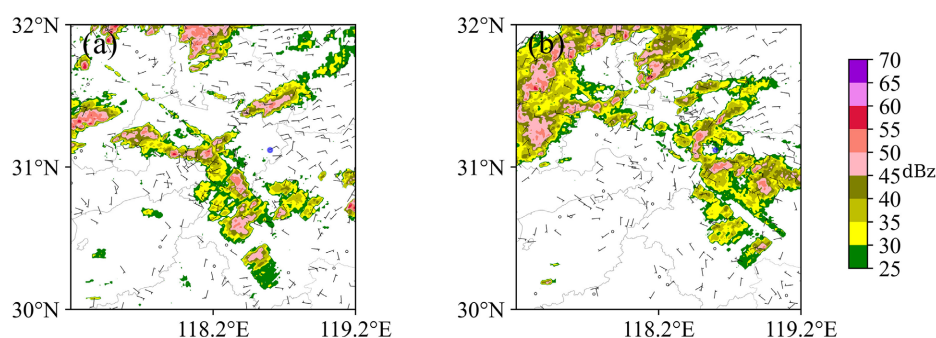


Figure 5. Wind field and Hefei S-band radar combination reflectivity factor on July 19th (a) 17:00, (b) 18:00 (Hide echoes below 25 dBZ)

图 5. 7 月 19 日风场和合肥 S 波段雷达组合反射率因子(a) 17 时、(b) 18 时(隐去 25 dBZ 以下的回波)

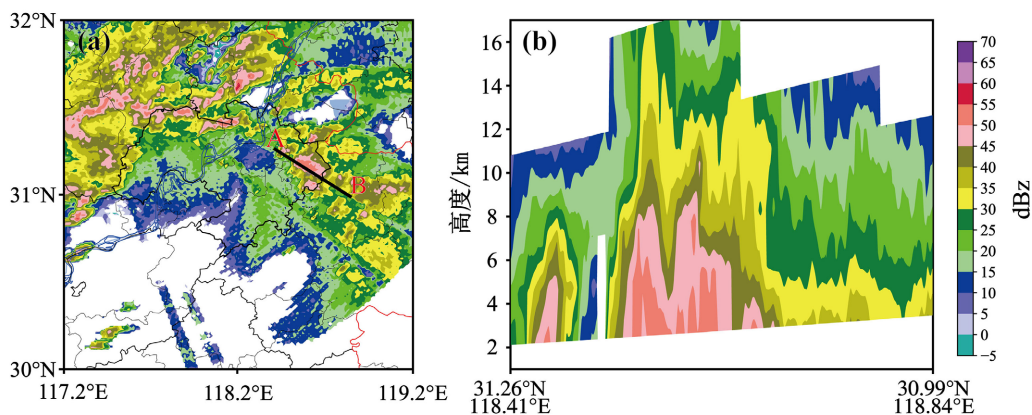


Figure 6. Hefei S-band radar at 18:30 on July 19 (a) combined reflectivity factor, (b) profile

图 6. 合肥 S 波段雷达 7 月 19 日 18:30 (a) 组合反射率因子、(b) 剖面

18:30 前后,强对流回波移至湾沚区国家站附近。沿强回波带选取 A (118.41°E, 31.26°N) 和 B (118.84°E, 30.99°N) 作垂直剖面分析(图 6), 结果表明该对流系统发展深厚, 回波顶高超过 16 km, 水平呈多个 γ 中尺度风暴单体排列特征, 整体质心较高。其中 45 dBz 以上强回波可达 8 km 以上, 局地超过 10 km, 表明上升运动强烈, 对流发展旺盛。对应时段湾沚国家站小时雨强达 39.5 mm, 说明强回波与降水具有良好对应关系, 表现出典型“高质心”强对流降水特征。

进一步结合 X 波段雷达垂直剖面(图 7)分析, 整体仍表现为高质心结构, 但回波中存在一定悬垂特征, 指示局地存在垂直风切变。结合南京站资料, 20 时深层垂直风切变为 16.6 m/s(表 1), 说明此次强对流发生在中等风切变环境下。综合来看, 本次过程呈现“高质心、局地强降水及中等垂直切变”的典型特征。

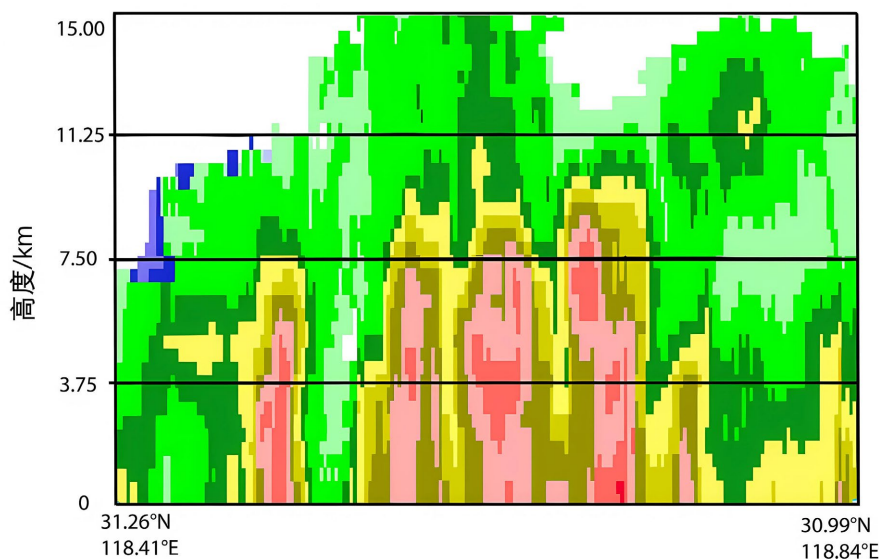


Figure 7. Vertical cross-section of the Wuhu X-band radar at 18:30 BST 19 July
图 7. 芜湖 X 波段雷达 7 月 19 日 18:30 剖面

4. 暴雨过程的热力和动力条件

为进一步分析此次短时强降水的热力不稳定及动力结构特征, 图 8 给出了 7 月 19 日过暴雨中心的假相当位温(θ_{sc})及涡度的经向垂直剖面, 从中可较为清晰地识别暴雨发生前后的热力层结及动力结构演变。

暴雨发生前(图 8(a)), 34°N 以南区域整层大气处于深厚湿层控制之下。在暴雨区(31°~32°N), 700 hPa 以下 θ_{sc} 等值线密集, 表现为湿不稳定层结; 700~600 hPa 为湿中性层结; 500 hPa 以上转为湿稳定层结。34°N 以北在 650 hPa 附近存在 θ_{sc} 低值中心(约 320 K), 反映出北方干冷空气的影响已开始显现。整体来看, 暴雨发生前大气层结已具备一定不稳定性, 但仍处于逐步调整阶段。

暴雨发生时(图 8(b)), 暴雨区 850 hPa 以下转为湿不稳定层结, 850~700 hPa 为湿中性层结, 700 hPa 以上维持湿稳定结构。与此同时, 北方冷空气持续南下并向低层扩展, 在 33.5°N 附近边界层 θ_{sc} 降至约 344 K, 干冷空气嵌入近地面暖湿气流之中。一方面, 该冷空气强迫暖湿空气抬升至中低层, 使对流不稳定得以维持并进一步发展; 另一方面, 促进近地层潜在不稳定能量释放, 从而增强对流发展强度并导致降水显著增强。

从动力条件来看, 暴雨发生前(图 8(c)), 暴雨区 700 hPa 以下呈现倾斜的正涡度分布, 近地面存在约 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度中心; 暴雨发生时(图 8(d)), 正涡度迅速向上发展并伸展至 200 hPa, 形成深厚的正

涡度柱结构, 其中涡度中心最大值约 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 出现在 500 hPa 附近。正涡度对应气旋性旋转及上升运动增强, 其两侧为负涡度区, 且等值线密集、梯度较大, 进一步表明该区域动力强迫显著。

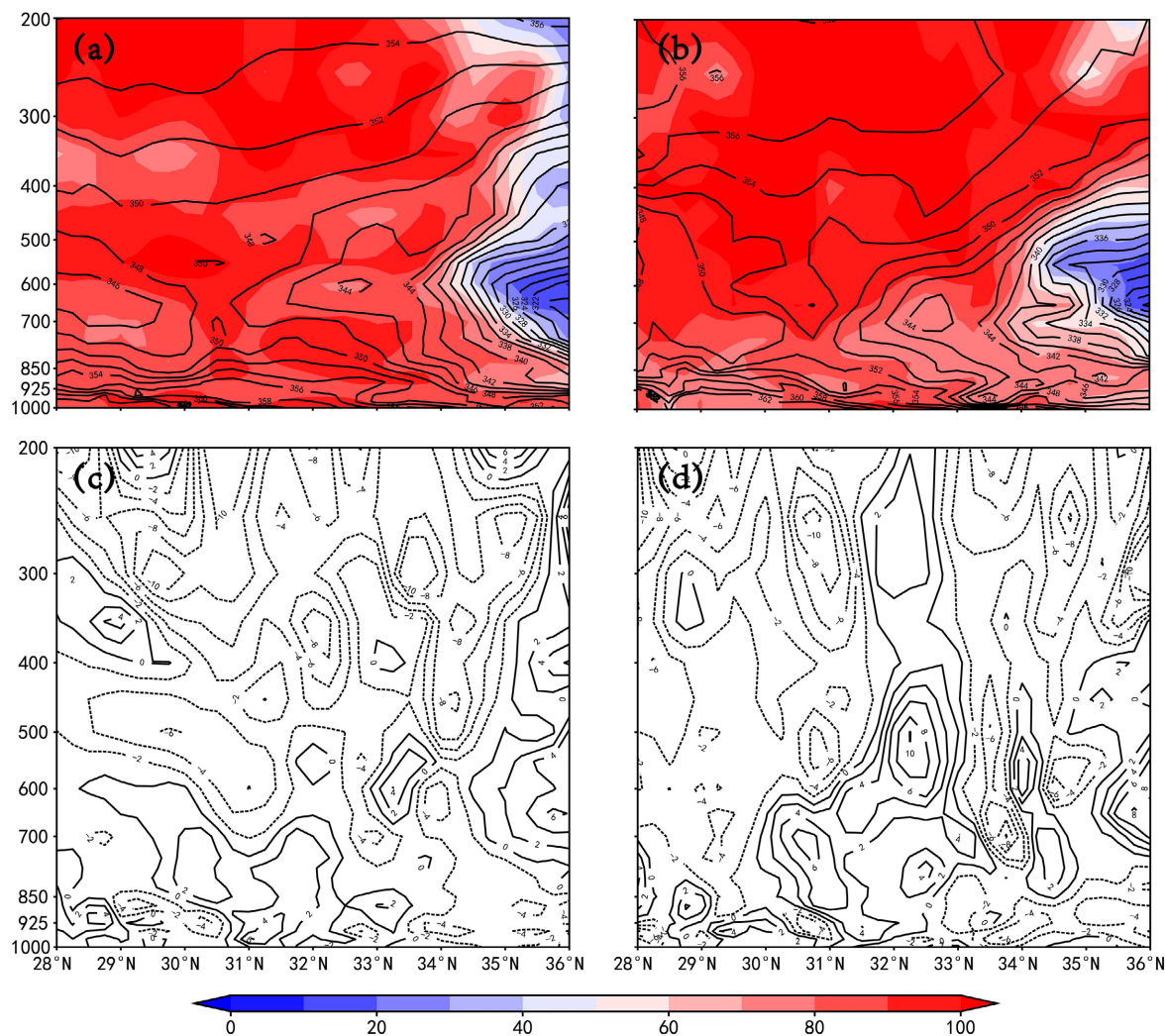


Figure 8. Vertical cross-sections along 118°E of thermodynamic and dynamic atmospheric structures on 19 July 2023: (a) equivalent potential temperature (contours; unit: K) and relative humidity (shaded; unit: %) at 08:00; (b) equivalent potential temperature (contours; unit: K) and relative humidity (shaded; unit: %) at 18:00; (c) vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}) at 08:00; and (d) vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}) at 18:00

图 8. 2023 年 7 月 19 日沿 118°E 垂直剖面的大气热力和动力结构特征(a) 08 时假相当位温(实线, 单位: K)和相对湿度(阴影, 单位: %); (b) 18 时假相当位温(实线, 单位: K)和相对湿度(阴影, 单位: %); (c) 08 时涡度(单位: 10^{-5} s^{-1}); (d) 18 时涡度(单位: 10^{-5} s^{-1})

综上, “7·19” 短时暴雨过程发生在深厚湿层与不稳定层结叠置的热力背景下, 同时伴随明显的正涡度柱发展与增强, 上升运动显著加强, 从而共同促成了此次短时强降水的发生与发展。

5. 结论和讨论

利用常规观测、加密自动气象站、S 波段多普勒天气雷达、X 波段相控阵雷达及 ERA5 再分析资料, 对 “7·19” 短时暴雨过程的环流背景、环境场及中尺度特征进行了综合分析, 主要结论如下:

(1) 2023 年 7 月 19 日, 芜湖位于副热带高压边缘, 高温高湿环境为强对流发展提供了充足的水汽和

能量条件。200 hPa 高空急流右侧分流区形成明显高空辐散, 850 hPa 低层辐合显著, 同时北方冷空气南下触发不稳定层结发展, 在高低层系统良好耦合背景下, 最终导致“7·19”短时暴雨过程发生。

(2) FY-4A 卫星云图表明, 此次强降水过程与多个中尺度对流系统(MCS)的发展和合并密切相关。强降水主要位于 TBB 等值线密集区附近, 且 TBB 中心越低、梯度越大, 对应降水强度越强。19 日 20 时 101 mm 的极端小时雨强正出现在多个 MCS 合并并迅速加强阶段, 说明对流系统组织化增强和尺度扩大对极端短时强降水形成具有重要作用。

(3) 地面风场分析显示, 暴雨发生前芜湖东侧为偏东风、西侧为偏西风, 地面呈明显“对头风”结构, 近地层水汽辐合强烈, 为对流触发提供了有利动力条件。雷达资料表明, 强降水主要出现在对流回波合并增强阶段, 对流系统垂直发展深厚, 具有明显高质心特征, 并伴随一定垂直风切变, 表现出“高质心、中等切变、局地极端短时强降水”的典型特征。

(4) 热动力结构分析表明, 暴雨发生前低层已存在明显不稳定层结; 暴雨发生时, 850 hPa 以下为湿不稳定层结, 850~700 hPa 为湿中性层结, 700 hPa 以上为湿稳定层结。与此同时, 北方干冷空气向近地层暖湿气流中嵌入, 一方面迫使暖湿空气抬升, 维持中低层对流不稳定; 另一方面促进近地层潜在不稳定能量释放, 从而有利于强对流发展及降水增强。此外, 本次过程虽无明显低空急流参与, 但整层水汽条件充沛、暖云层深厚, 表明在高湿高效降水环境下, 同样能够产生极端短时强降水。

(5) 本研究对“7·19”短时暴雨过程的分析主要基于常规观测、雷达及再分析资料, 对新型探测资料的应用仍相对不足。今后可进一步结合雨滴谱仪、微波辐射计等高时空分辨率探测资料, 深入分析短时暴雨的微物理结构与演变特征, 并结合高分辨率数值模式开展对流单体模拟研究, 以进一步加深对短时强降水形成机制的认识, 为此类天气的预报预警提供参考。

参考文献

- [1] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-654.
- [2] Johns, R.H. and Doswell, C.A. (1992) Severe Local Storms Forecasting. *Weather and Forecasting*, **7**, 588-612.
[https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1992\)007<0588:slsf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1992)007<0588:slsf>2.0.co;2)
- [3] 赵思雄, 孙建华. 我国暴雨机理与预报研究进展及其相关问题思考[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 422-430.
- [4] 李永军, 徐金波, 李玄, 等. 四川南部一次局地暖区暴雨中尺度特征及成因[J]. 大气科学, 2025, 49(3): 664-680.
- [5] 马鸿青, 丁和悦, 董疆南, 等. 山脉“拐角”下游平原 1 次局地暴雨的特征分析[J]. 山地气象学报, 2025, 49(2): 13-20.
- [6] 朱灵芝, 袁冬美, 杨良富. 2023 年初夏赣北南部 1 次暴雨过程空报分析[J]. 山地气象学报, 2026, 50(2): 49-58.
<https://link.cnki.net/urlid/52.1177.p.20250523.1751.016>, 2025-09-01.
- [7] Wang, H., Luo, Y.L. and Jou, B.J. (2014) Initiation, Maintenance, and Properties of Convection in an Extreme Rainfall Event during SCMREX: Observational Analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **119**, 13206-13232.
<https://doi.org/10.1002/2014jd022339>
- [8] Weckwerth, T.M., Wilson, J.W., Wakimoto, R.M. and Crook, N.A. (1997) Horizontal Convective Rolls: Determining the Environmental Conditions Supporting Their Existence and Characteristics. *Monthly Weather Review*, **125**, 505-526.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0505:hcrdte>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0505:hcrdte>2.0.co;2)
- [9] Wilson, J.W. and Megenhardt, D.L. (1997) Thunderstorm Initiation, Organization, and Lifetime Associated with Florida Boundary Layer Convergence Lines. *Monthly Weather Review*, **125**, 1507-1525.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1507:tioala>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1507:tioala>2.0.co;2)
- [10] 李明娟, 郭大梅, 张蔚然, 等. 陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制[J]. 暴雨灾害, 2025, 44(1): 19-30.
- [11] 张端禹, 崔春光, 廖移山. 武汉市一次对流梅雨暴雨过程诊断分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 594-604.
- [12] 杨晓霞, 夏凡, 张骞, 等. 鲁西北连续两次强降水过程对比分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 605-618.
- [13] 胡雯, 黄勇, 汪腊宝. 夏季江淮区域对流云合并的基本特征及影响[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 206-213.
- [14] 黄勇, 吴林林, 冯妍. 两次对流云合并过程的双偏振雷达观测研究[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1474-1485.

- [15] 刘裕禄, 胡雯, 方祥生. 江淮夏季对流云合并发生的天气学条件[J]. 气象科技, 2011, 39(3): 272-279.
- [16] 鲁亚斌, 李华宏, 闵颖, 等. 一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象, 2018, 44(5): 645-654.
- [17] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 156-165.