

2024年5月26~27日武汉一次强降水过程成因分析

江 鸿¹, 徐迎春¹, 程 菲²

¹武汉市气象局, 湖北 武汉

²武汉市江夏区气象局, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年1月10日; 录用日期: 2025年2月18日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

利用MICAPS常规观测、湖北区域气象自动站资料、欧洲中期天气预报中心模式(ECMWF)及ERA5 (第五代欧洲再分析)资料、中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)等资料, 针对2024年5月26~27日武汉市一次强降水过程的成因进行了分析。本次强降水过程是在高低层系统的相互作用下产生的局地短时强降水过程。武汉上空的对流层中高层环流呈辐散特征, 低层配合有气旋性辐合, 冷暖气流交汇, 对流层中低层集聚大量不稳定能量, 850 hPa的假相当位温高值区, 武汉南部 $\Delta\theta_{se500-850}$ 达到-10℃, 大气可降水量在52~60 mm之间, 为本次强降水提供了较好的动力条件、能量条件、水汽条件以及对流不稳定层结。

关键词

强降水, 中尺度对流系统, 成因分析

Causal Analysis of a Heavy Precipitation on May 26~27, 2024 in Wuhan

Hong Jiang¹, Yingchun Xu¹, Fei Cheng²

¹Wuhan Meteorological Bureau, Wuhan Hubei

²Jiangxia District Meteorological Bureau of Wuhan City, Wuhan Hubei

Received: Jan. 10th, 2025; accepted: Feb. 18th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

Utilizing MICAPS routine observation data, automatic meteorological station data from Hubei region, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) model data, ERA5 (fifth-

文章引用: 江鸿, 徐迎春, 程菲. 2024 年 5 月 26~27 日武汉一次强降水过程成因分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(2): 217-225. DOI: 10.12677/ag.2025.152023

generation European reanalysis) data, and the China Meteorological Administration's Mesoscale Numerical Weather Prediction System (CMA-MESO) data, this study analyzed the causes of a heavy precipitation event that occurred in Wuhan on May 26~27, 2024. This heavy precipitation event was a local short-time intense precipitation process resulting from the interaction between upper and lower atmospheric systems. The mid-to-upper tropospheric circulation above Wuhan exhibited divergent characteristics, while the lower layers were accompanied by cyclonic convergence, with the convergence of cold and warm air currents. A substantial amount of unstable energy accumulated in the mid-to-lower troposphere. The high-value area of pseudo-equivalent potential temperature was observed at the 850 hPa level, with $\Delta\theta_{se500\sim850}$ reaching -10°C in the southern part of Wuhan. The atmospheric precipitable water content ranged between 52~60 mm, providing favorable dynamic, energetic, and moisture conditions, as well as convective instability, for this heavy precipitation event.

Keywords

Heavy Precipitation, Mesoscale Convective System, Causal Analysis

Copyright © 2025 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

暴雨经常造成洪涝、城市内涝、交通中断、农作物受损等直接经济损失，还可能引发山体滑坡、泥石流等地质灾害，尤其是在汛期，显得尤为重要。许多学者在暴雨的成因和影响系统方面做了大量的研究。暴雨的发生往往与特定的大气环流形势密切相关[1]，如高空槽、冷涡、切变线、副热带高压的边缘等系统的存在[2]-[5]，能够为暴雨的发生提供有利的环境条件，低槽的伸展和加深则能够引导冷空气南下[6]，与暖湿气流交汇，促使暴雨的发生；在暴雨天气过程中，水汽输送通道的建立为降雨区提供了稳定而强盛的水汽，是该地暴雨形成的基础，高温高湿的大气以及较高的位势不稳定为暴雨和强对流天气提供有利条件，高、低空辐合辐散的配置会影响垂直上升运动，这种配置也是暴雨发生的动力机制[7] [8]。形成暴雨的主要原因还有低层冷空气侵入、强盛的不稳定能量和充沛而又深厚的水汽条件[9]。唐钱奎等[10]提出对流指数可以作为预报强降水的一种指标，水汽密度的垂直分布与大气可降水量分布有较强的相关性，“上干下湿，上冷下暖”的温度配置结构，是强对流天气形成的有利条件。周长春等[11]指出风场辐合区对强降水的落区及移动具有指示意义。

2024年5月26~27日武汉市气象台发布2024年首个暴雨红色预警，降水突发性强，此次局地暴雨到大暴雨，雨强大，正值上班早高峰时段，对交通造成一定的不利影响。本文对5月26~27日武汉的一次暴雨过程的成因进行分析和诊断研究，为今后武汉暴雨的临近预报和预警提供参考依据。

2. 降水实况和特点

2024年5月26日12时~27日12时，武汉市出现短时强降水，局部暴雨到大暴雨，强降水位于武汉中部和南部，累计雨量50~121毫米。区域站资料显示(图1(a))，100 mm以上3站，江夏区郑店站121.6 mm、江夏区金水花篮棚站102.4 mm、东西湖区泾河站107.6 mm。50~100 mm共35站。最大小时雨强为江夏区郑店站71.5毫米(27日08时)；7站5分钟滑动小时雨强大于50 mm，蔡甸区桐湖农场站2:30~3:30、新洲道观河站3:15~4:15、东西湖区新沟站5:10~6:10、江夏金水花篮棚5:00~6:00、江夏区桂子米业站

5:25~6:25、江夏区金口长江站 6:25~7:25、江夏区郑店站 7:00~8:00。从江夏区一个强降水区域站的单站逐小时降水量时间演变(图 1(b))可以看出降水具有突发性，本次过程主要特点是短时强降水明显。

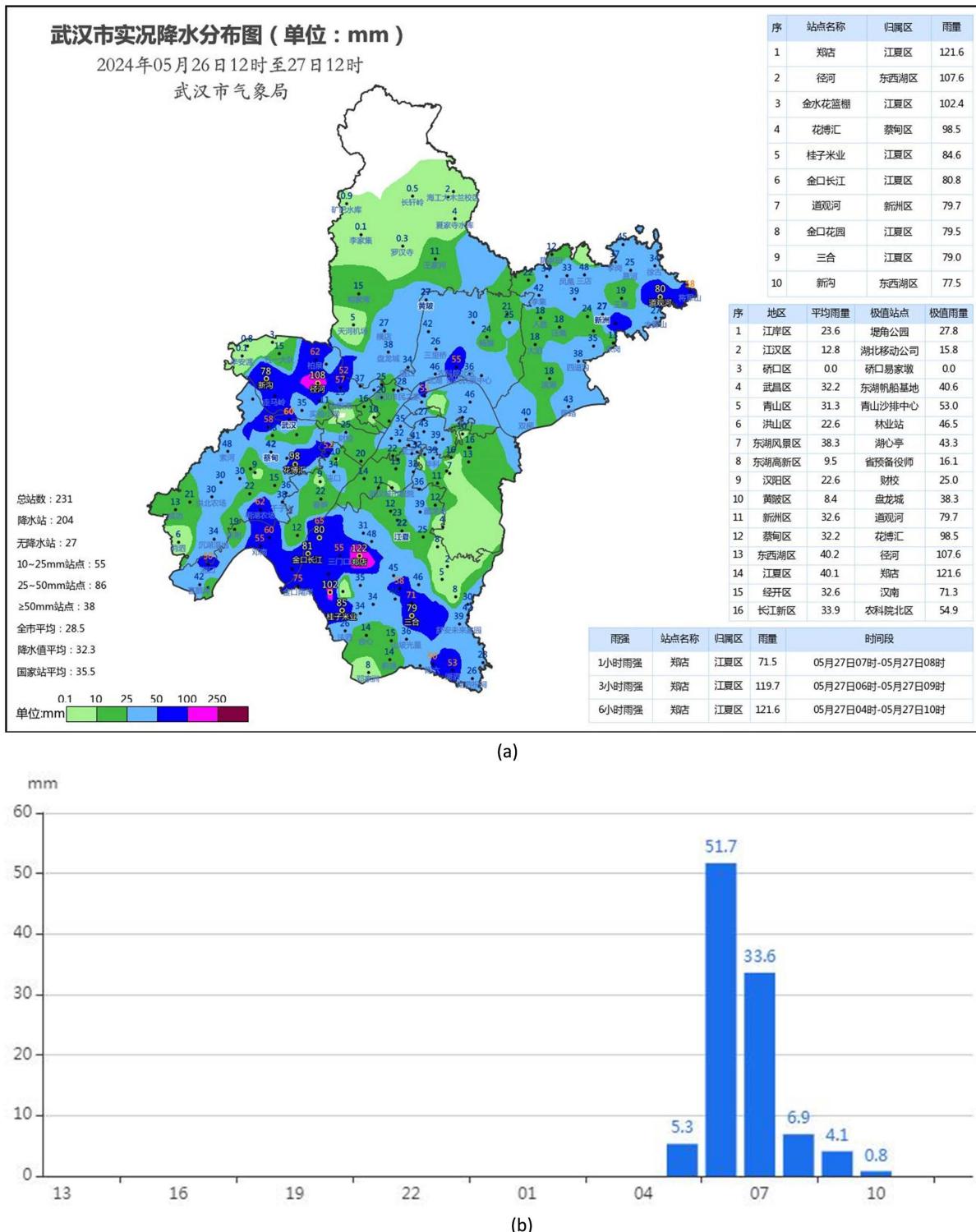


Figure 1. (a) 24-hour precipitation; (b) Temporal evolution of hourly precipitation at Jinshui Hualan Station in Jiangxia District
图 1. (a) 24 小时降水; (b) 江夏区金水花篮站逐小时降水量时间演变

3. 环流形势与影响系统

强降水天气发生前, 5月26日08时, 我国黑龙江附近有东北冷涡形成, 随着东北冷涡转动和东移, 冷涡后部不断有冷空气分散南下, 高原东部有短波槽沿着副高北侧东移, 配合中低层切变线影响, 湖北中东部有明显的降水发展, 武汉受其影响, 于27日凌晨开始, 我市出现局地暴雨到大暴雨天气(图2)。

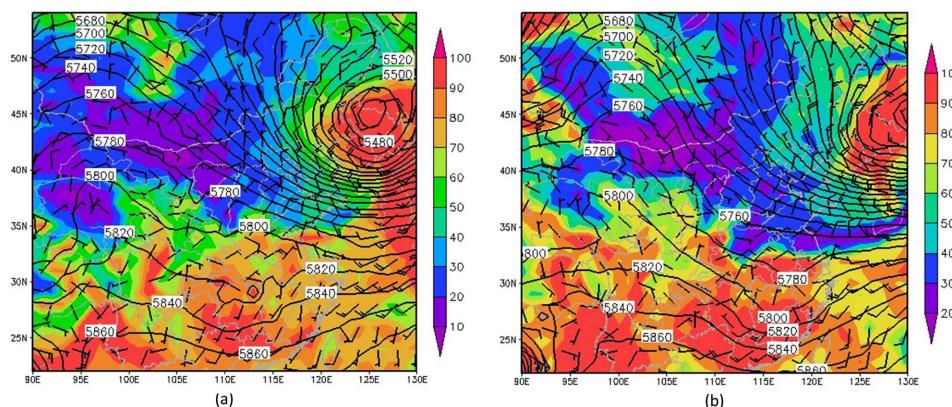


Figure 2. (a) 500 hPa geopotential height field (contour lines), 850 hPa wind field, and humidity (shaded) at 20:00 on May 26, 2024; (b) 500 hPa geopotential height field (contour lines), 850 hPa wind field, and humidity (shaded) at 08:00 on May 27, 2024

图2. (a) 2024年5月26日20时500 hPa高度场(等值线)、850 hPa风场和湿度(填色); (b) 2024年5月27日08时500 hPa高度场(等值线)、850 hPa风场和湿度(填色)

4. 中尺度对流系统

4.1. 中尺度对流系统的演变

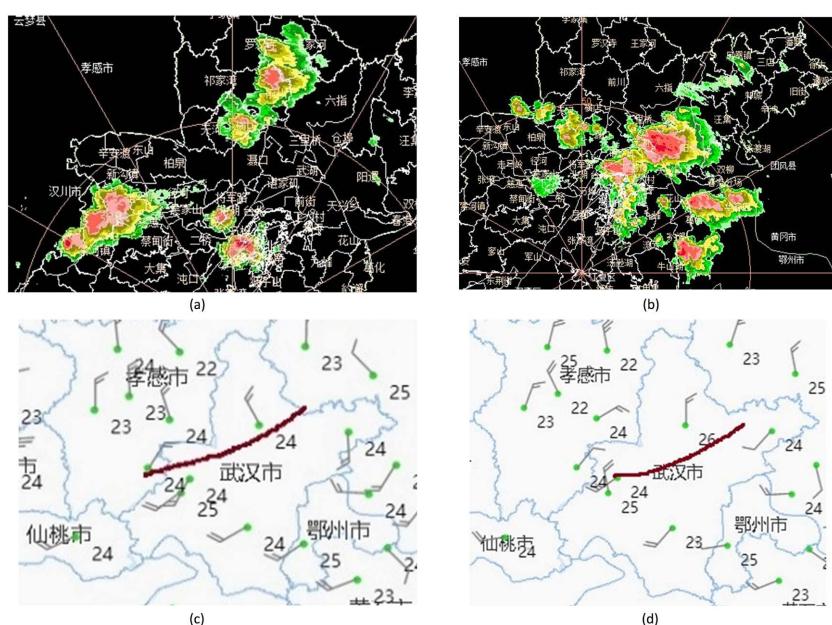


Figure 3. Radar composite reflectivity images on May 26th: (a) 13:00; (b) 14:00; Surface observation station wind field and dew point temperature maps on May 26th: (c) 13:00; (d) 14:00.

图3. 5月26日雷达组合反射率图: (a) 13时; (b) 14时; 5月26日地面观测站风场和地面露点温度图; (c) 13时; (d) 14时

本次过程根据强降水影响程度可以分为两个阶段：第一个阶段 26 日午后到傍晚前后，局地出现了短时强降水、雷电，第二阶段 27 日凌晨到上午，局地出现暴雨和大暴雨。第一个阶段，卫星云图显示，26 日 13 时之后，武汉中部形成一条西南至东北走向的地面辐合线，受其抬升影响，不断有对流云团生产、合并、发展，之后逐渐东移出境。在 TBB 梯度较密集的地方，上升运动发展旺盛，出现短时强降水天气。雷达显示，13 时开始武汉西部有对流出现，对流回波向东北方向移动过程中不断有新生对流回波生产，并在移动过程中逐渐组织化，在长江新区和新洲区域加强，此时长江新区和新洲等地出现了较密集的雷电活动和短时强降水，最大小时雨强为 28.3 毫米。16 时开始武汉的地面风场转为偏北风，武汉的雨势减弱(图 3)。

第二阶段，26 日 20 时高空低槽移近我市，配合中低层切变线，荆、咸宁一带出现大面积的层云回波，仙桃附近有分散对流回波发展。武汉 27 日 01 时开始，武汉市北部黄陂、新洲不断有新生对流回波发展，未来将与仙桃对流回波连接发展，形成一条仙桃至新洲降水回波带，在降水回波带前端镶嵌有分散对流回波发展，并向东移动。从地面区域站风场可知，27 日 01 时至 05 时在武汉蔡甸南部、蔡甸、经开、江夏一带有明显风场辐合带维持，当降水回波移入该辐合带中，武汉南部蔡甸、经开、江夏有短时强降水回波发展，最强回波为 59 dBZ，最大小时雨强 71.5 毫米，06 时开始该地面辐合带逐渐东移，但强降水回波仍位于经开附近，7 时强降水回波开始东移影响江夏，滞后约 2 小时左右。强降水回波移入江夏后，主要影响降水南部区域，这与地面风场辐合线区域相对吻合，08 时江夏站风向转为西北风，地面风场辐合线移入咸宁至黄石附近，武汉江夏区域降水回波开始减弱，并移出武汉(图 4)。

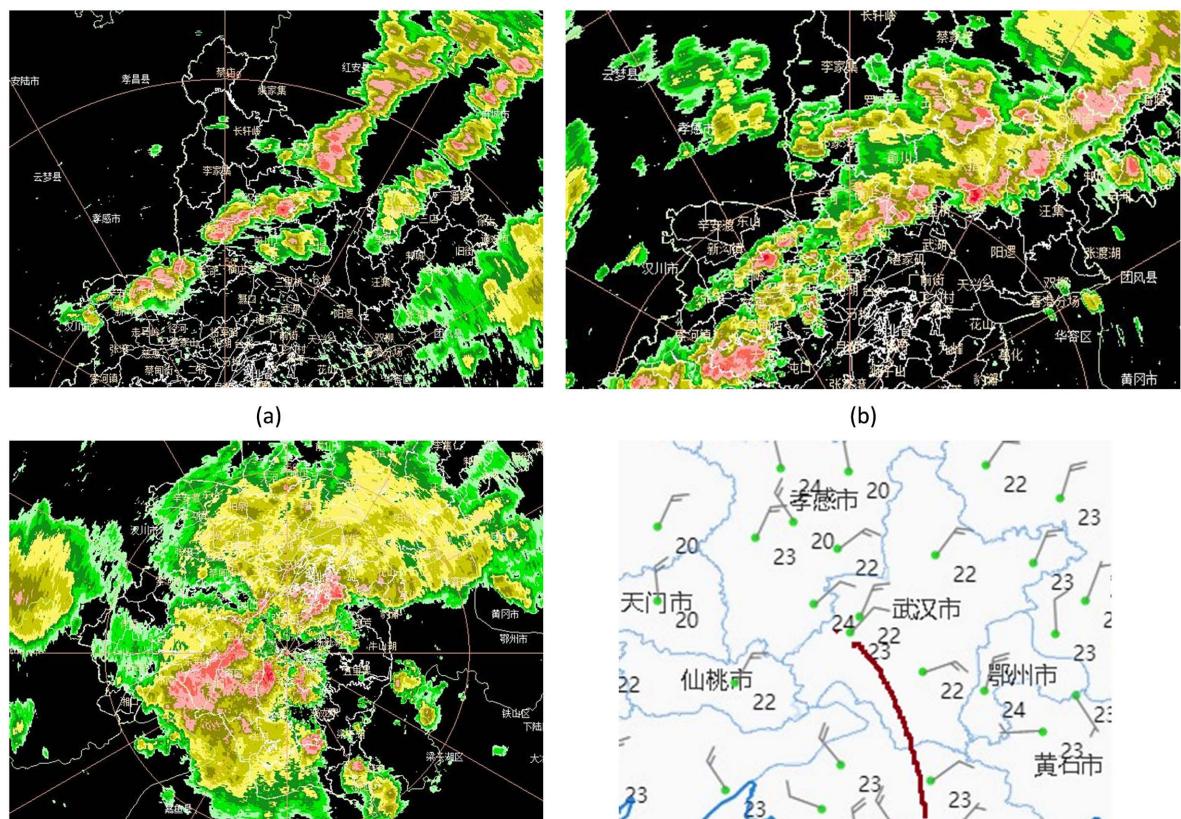


Figure 4. Radar composite reflectivity images on May 27th: (a) 01:00; (b) 03:00; (c) 07:00; (d) Surface observation station wind field and dew point temperature map at 04:00 on May 27th

图 4.5 月 27 日雷达组合反射率图(a)01 时；(b)03 时；(c)07 时；(d)5 月 27 日 04 时地面观测站风场和地面露点温度图

4.2. 中尺度对流系统的触发和维持机制

利用探空资料、区域自动站观测资料对中尺度对流系统的触发和维持机制进行分析。26 日 08 时武汉站探空显示(图 5(a)), CAPE 值 1236.8, K 指数为 26°C, 0~3 km 垂直风切 10.9 m/s, 700 hPa 以上有明显的干层, 上干下湿, 抬升凝结高度较低, 能量条件较好, 低层的垂直风切一般。第一阶段, 武汉位于中低层切变线南部暖湿气流中, 13 时地面辐合线压至武汉一带, 触发对流, 导致了 26 日午后产生了分散性的对流, 出现了阵雨或雷阵雨天气。

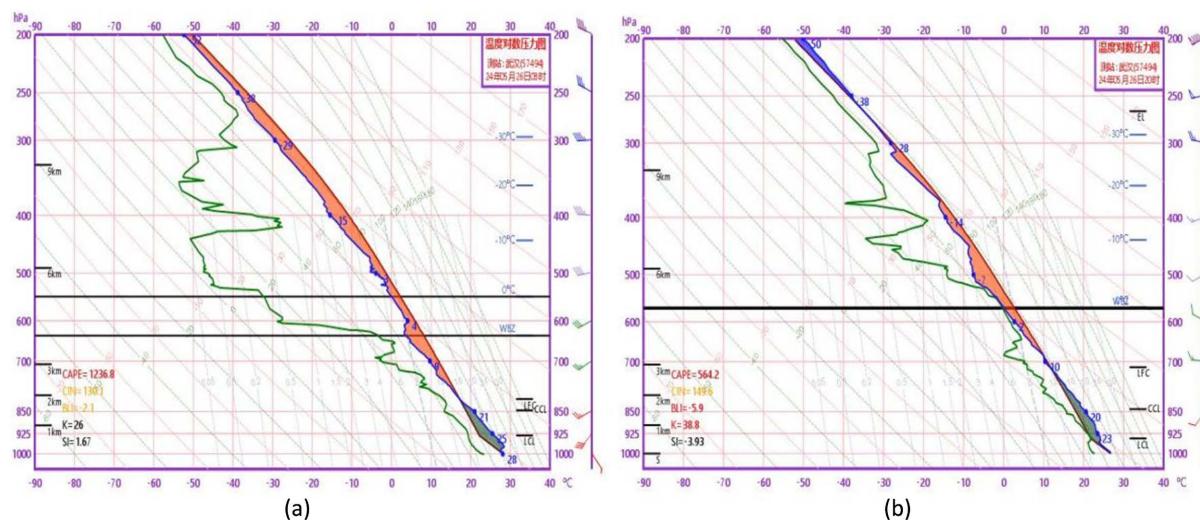


Figure 5. Temperature-log pressure diagrams: (a) 08:00 on May 26th; (b) 20:00 on May 26th

图 5. 温度对数压力图(a) 5月26日08时; (b) 5月26日20时

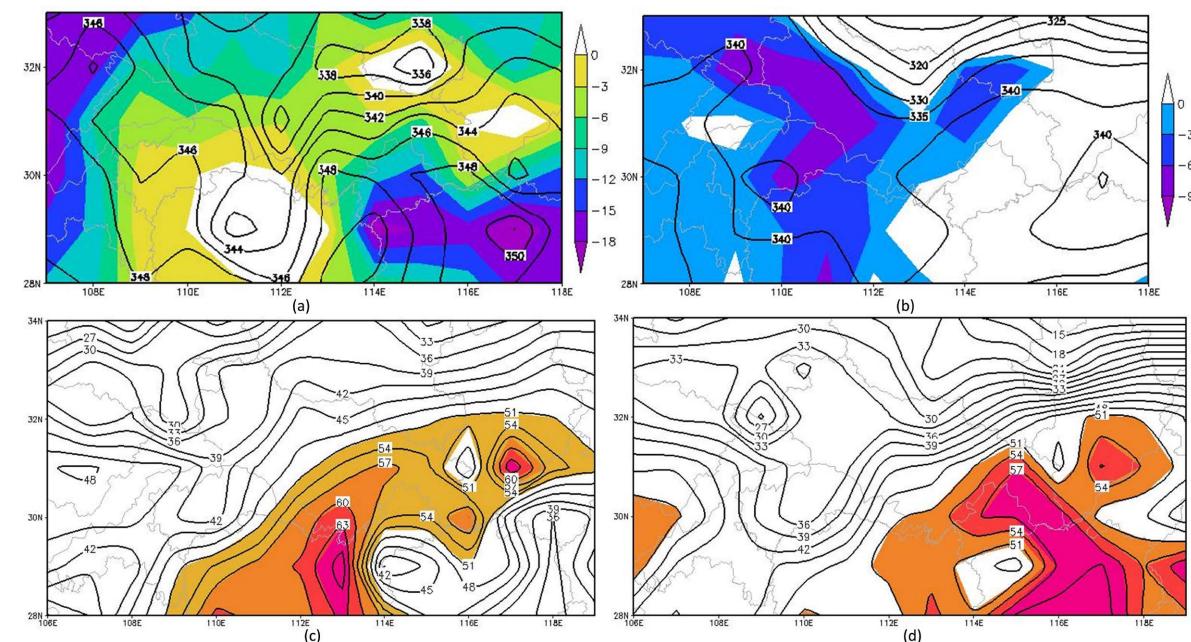


Figure 6. Pseudo-equivalent potential temperature (contours) and $\Delta\theta_{se500-850}$ (shaded) at 850 hPa: (a) 20:00 on May 26, 2024; (b) 08:00 on May 27, 2024; Total Precipitable Water: (c) 20:00 on May 26, 2024; (d) 08:00 on May 27, 2024

图 6. 850 hPa 上的假相当位温(等值线)和 $\Delta\theta_{se500-850}$ (填色): (a) 2024 年 5 月 26 日 20 时; (b) 2024 年 5 月 27 日 08 时; 整层大气可降水量: (c) 2024 年 5 月 26 日 20 时; (d) 2024 年 5 月 27 日 08 时

第二阶段，26日20时武汉站探空显示(图5(b)), K指数为38.8°C, SI指数为-3.93, 850 hPa的温度28.1°C, 925 hPa的露点温度20°C, 表明白天增暖增湿, 大气环境层结状态不稳定且对流易被触发, 600 hPa以上存在干层, 上干下湿, 对流性强, 但是低层垂直风切弱。从26日20时武汉上空850 hPa的假相当位温水平分布图中可以看出, 26日20时武汉南部正处于假相当位温高值中心区, θ_{se} 的分布极为密集, 不稳定能量大量积累。假相当位温的轴线呈南北走向, 荆州、咸宁一带的暖舌, 持续向武汉地区输送水汽和能量, 为强降水的发生积累了不稳定能量。从26日20时的 $\Delta\theta_{se500-850}$ 填色图中可以看出, 武汉的 $\Delta\theta_{se500-850} < 0^\circ\text{C}$, 说明武汉存在对流不稳定层结。武汉南部 $\Delta\theta_{se500-850}$ 的中心值达到-10°C, 已为强的对流不稳定区域, 一旦有触发条件, 就会轻易地爆发强对流天气。根据大气可降水量图显示, 26日20时武汉上空大气可降水量在52~60 mm之间, 水汽条件比较充沛。26日20时以后中低层南风发展, 中低层切变线逐渐南压到武汉一带, 触发强对流。中低层切变线在武汉一带移动缓慢, 有利于中尺度对流系统的发展和强降水的维持。随着武汉强降水的持续, 至27日08时, 可以明显看到武汉地区假相当位温的值减小, 说明水汽和不稳定能量在降水过程中已经得到了释放, 对流不稳定指数 $\Delta\theta_{se500-850}$ 正逐渐变为0。这表明在暴雨发生前, 低层850 hPa不稳定能量不断聚集, 降水过程中能量逐渐释放, 直至大气层结恢复至稳定状态, 暴雨过程结束(图6)。

综上可知: 第一阶段以对流性降水为主, 局地性强, 呈现分散对流特征, 对流在暖区扰动触发, 出现了局地较密集的雷电和短时强降水。第二个阶段以对流在中低层切线附近呈组织化发展, 中低层的暖湿特征, 为对流发展加强提供了有利的能量条件和水汽条件。

5. 预报偏差分析

5.1. 强降水偏差分析

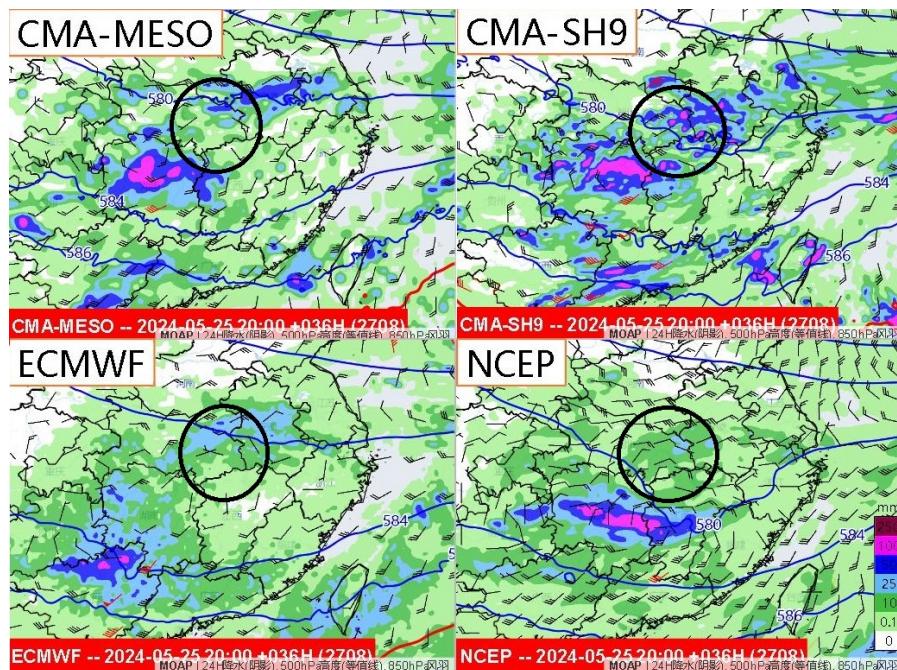


Figure 7. Precipitation forecasts from 08:00 on May 26th to 08:00 on May 27th, initiated at 20:00 on May 25th, by CMA-MESO model, CMA-SH9 model, ECMWF model, and NECP model; 500 hPa geopotential height field (contours) and 850 hPa wind field at 08:00 on May 27th

图 7. CMA-MESO 模式、CMA-SH9 模式、ECMWF 模式和 NECP 模式; 5月25日20时起报5月26日08时~5月27日08时降水量; 5月27日08时500 hPa高度场(等值线)和850 hPa风场

从5月26日08时~27日08时实况与主客观降水预报对比(图7)可知,全球模式预报对暴雨量级的降水全部漏报,中尺度模式有一定的反映。ECMWF、NECP、CMA-MESO和CMA-SH9 4家模式在5月25日20时起报的5月26日08时~27日08时降水与实况均有一定的偏差。ECMWF、NECP 2家模式对武汉的强降水均未报出,ECMWF模式对武汉报了中到大雨,而且大雨分布在武汉中北部,虽然量级预报偏小,但是对武汉中北部的带状雨带还是有所反映的,NECP模式更是对强降水明显低估,仅预报了中雨量级。CMA-MESO、CMA-SH9 2家模式对强降水有所反映,在武汉报了暴雨或大暴雨量级,但是CMA-MESO暴雨位置偏北,报到了武汉的北部;CMA-SH9暴雨到大暴雨报到了武汉中北部,位置略有偏北。由此可知,全国模式和中尺度模式对系统性特征不太明显、局地性较强的对流性降水预估能力有限。

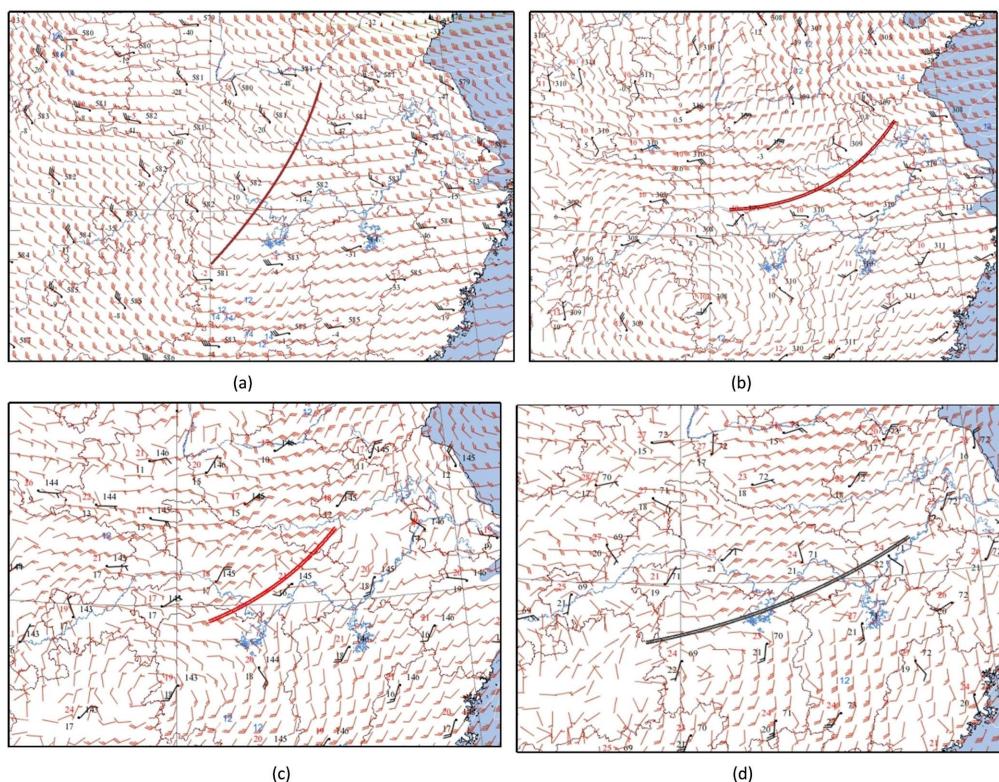


Figure 8. Synoptic verification of wind fields at 500 hPa; (a) 700 hPa; (b) 850 hPa; (c) and 925 hPa; (d) for the forecast initiated at 08:00 on May 26th and valid at 20:00 on the same day (Red: ECMWF model; Blue: Observed data)

图8. 5月26日08时起报5月26日20时500 hPa; (a) 700 hPa; (b) 850 hPa; (c) 925 hPa; (d) 风场天气学检验图(红色: ECMWF 模式; 蓝色: 实况场)

26日19:30强降水回波带主要位于鄂东南,地面中东部基本已经转为北风,因此预报员对系统东移速度预判产生错觉,对预报形势场产生怀疑,到20时分析高空实况探测数据后,发现高空500 hPa低槽和中低层切变线并未移出武汉,而是位于武汉西侧,故及时调整预报思路,仍预计当晚有局地强降水(图8)。

5.2. 强降水预报难点

此次强降水过程突发性强,局地性强,累计雨量大。多家模式预报差异大。全球模式降水预报明显偏小,中尺度模式位置有偏差,给精细精准定量的短期预报带来了一定的难度。

此次过程引发的中小尺度系统局地性强、突发性强、可预报性差,尤其对单点的小时雨强预测难度

大, 目前的观测条件下, 对其信息掌握还不够全面, 对其发生发展规律认识和预报能力还不能满足需求。

5.3. 预报改进思路

此次过程的降水检验结果表明, 中尺度模式表现较好, 能在一定程度上对强降水有所体现, 但仍存在较大误差, 给降水的精细化预报带来一定的难度。因此, 要加强多种数值模式的综合应用和检验评估, 除了解每种数值模式普遍性的特点, 更要关注天气系统临近时移动速度、强度的变化和检验结论, 结合实况对强降水的落区和强度做出有效的订正。在强降水的发布预警过程中, 要加强对多种观测资料的综合分析能力, 关注中尺度环境场的变化特征, 及时跟进对流系统生消变化, 订正预报结论, 为精细化预警服务提供参考。在业务预报中需综合全球模式和中尺度模式, 结合预报经验, 进行滚动订正, 并做好递进式气象服务。

6. 结论

(1) 本次强降水过程是在高低层系统的相互作用下产生的局地短时强降水过程。武汉上空的对流层中高层环流呈辐散特征, 低层配合有气旋性辐合, 冷暖气流交汇, 对流层中低层集聚大量不稳定能量, 850 hPa 的假相当位温高值区, 武汉南部 $\Delta\theta_{se500-850}$ 达到 -10°C , 大气可降水量在 52~60 mm 之间, 为本次强降水提供了较好的动力条件、能量条件、水汽条件以及对流不稳定层结。

(2) 本次过程单点强降水预报难度大, 但是对系统性降水预报准确率较高, 其中物理量假相当位温和整层大气可降水量对本次过程发生发展有较好的指示作用。本次过程中地面区域自动站风场要素, 尤其是地面辐合线对强对流回波形成发展和影响范围有一定的指示作用。26 日 20 时探空实况对当晚的预报形势有较好的订正作用。

(3) 各家数值模式对降水预报均有偏差。对流性暴雨, CMA-SH9、CMA-MESO 模式比 ECMWF、NECP 模式略优, 但是位置仍有偏差, 而 ECMWF 模式虽对降水系统把握较好, 但对中小尺度系统相互作用的预报能力不足, 对对流性暴雨预报偏小。

参考文献

- [1] 陶杰, 陈久康. 低纬环流系统对江淮梅雨暴雨影响的数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 1994, 17(3): 315-320.
- [2] 刘国忠, 赖珍权, 钟祥平, 黄荣, 翟丽萍. “15.7”广西超长持续性暴雨过程多尺度特征分析[J]. 热带气象学报, 2017, 33(3): 357-367.
- [3] 毛程燕, 马依依, 顾振海, 王健疆, 李浩文. 2020 年春末夏初浙江省三次暖区暴雨过程诊断分析[J]. 气象科技, 2021, 49(6): 903-912.
- [4] 杨学斌, 代玉田, 崔森, 周成, 陈华凯, 张优琴. 山东夏季两次切变线暴雨过程对比分析[J]. 气象科技, 2015, 43(4): 688-696.
- [5] 王晓玲, 王艳杰, 陈赛男, 李银娥, 钟敏. 鄂东北地区两次大暴雨过程中尺度对流系统特征分析[J]. 气象与环境学报, 2016(4): 1-11.
- [6] 王孝慈, 李双君, 孟英杰. 武汉地区 4 次低质心类短时强降水对流风暴特征分析[J]. 气象, 2021, 48(5): 633-646.
- [7] 孙军, 湛云, 杨舒楠, 等. 北京 721 特大暴雨极端分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 2012, 38(10): 1267-1277.
- [8] 孙建华, 汪汇洁, 卫捷, 齐琳琳. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J]. 气象学报, 2016, 74(4): 542-555.
- [9] 李云, 缪启龙, 江吉喜. 2005 年 8 月 16 日天津大暴雨成因分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 83-88.
- [10] 唐钱奎, 鲁燕, 黄先伦. “8.26”成都区域性短时暴雨天气过程的对流指数分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(5): 518-523.
- [11] 周长春, 王春国. “7.3”成都短时强降水可预报性和地面中尺度特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2012(2): 65-69.