

基于多源观测资料的一次湖州暖区短时强降水过程分析

张琦蓓, 奚 雷, 常秉松, 王丹丹

湖州市气象局, 浙江 湖州

收稿日期: 2026年9月2日; 录用日期: 2026年10月23日; 发布日期: 2026年10月30日

摘 要

本文利用常规地面和高空观测资料、卫星云图及多波段天气雷达等资料, 对2024年夏季湖州一次暖区局地短时强降水过程进行了分析。结果表明: 本次强降水发生在高空冷涡槽前暖区、副高边缘的弱天气尺度强迫背景下, 异常充沛的水汽和极高的不稳定能量为强降水提供了极有利的环境条件。边界层辐合线与地形抬升是触发对流的主要机制, 阵风锋与湖风锋有效促进了长兴至吴兴平原地区的单体发展, 而低层切变线的维持以及弱环境风的共同作用则导致了风暴在安吉西南山区长时间滞留, 最终引发了局地暴雨。对造成长兴徐家浜站极端雨强的风暴进一步分析发现, 其低层存在小尺度涡旋, 且上升与下沉气流呈倾斜配置, 使风暴得以持续增强。同时, 深厚的暖云层、较低的回波质心结构以及较高的Z_{DR}和K_{DP}值, 均指示了高浓度大雨滴导致的高降水效率。对于此类弱强迫背景下的暖区暴雨, 强化卫星、雷达等多源资料对中小尺度系统的监测分析, 是提升预警提前量的关键。

关键词

强对流, 多普勒双偏振天气雷达, X波段相控阵雷达, 三维风场

Analysis of a Warm-Sector Short-Time Heavy Rain Event in Huzhou Based on Multi-Source Observational Data

Qibei Zhang, Lei Xi, Bingsong Chang, Dandan Wang

Huzhou Meteorological Bureau, Huzhou Zhejiang

Received: September 2, 2026; accepted: October 23, 2026; published: October 30, 2026

文章引用: 张琦蓓, 奚雷, 常秉松, 王丹丹. 基于多源观测资料的一次湖州暖区短时强降水过程分析[J]. 自然科学, 2026, 14(6): 735-741. DOI: 10.12677/ojns.2026.146077

Abstract

Utilizing conventional observations, satellite and multi-band radar data, this study analyzes a localized short-time heavy rain event in the warm sector over Huzhou during the summer of 2024. The result indicates that the heavy rain occurred in the warm sector ahead of an upper-level cold-vortex trough and on the edge of the subtropical high under a background of weak synoptic-scale forcing, with abundant moisture and extremely high instability, which provided highly favorable environmental conditions for the extreme precipitation. Boundary-layer convergence and orographic lifting were the primary mechanisms triggering convection. Gust fronts and lake-breeze fronts effectively promoted the development of convective cells over the Changxing-Wuxing, whereas the maintenance of a low-level shear line, combined with weak environmental winds, caused the storms to remain over the southwestern mountainous areas of Anji for a long time, ultimately resulting in localized torrential rain. Further analysis of the storm responsible for the extreme rainfall rate at the Xujiabangcun station in Changxing revealed the presence of a small-scale vortex in the lower levels, along with a tilted configuration of updrafts and downdrafts, which facilitated the storm's continuous intensification. Meanwhile, a deep warm-cloud layer, a relatively low echo centroid, and high values of both differential reflectivity (Z_{DR}) and specific differential phase (K_{DP}) collectively indicated high precipitation efficiency driven by high concentrations of large raindrops. For warm-sector heavy rain under weak synoptic forcing, enhancing the monitoring and analysis of meso- and small-scale systems by multi-source data, such as satellites and radars, is crucial for extending warning lead time.

Keywords

Severe Convection, Doppler Dual-Polarization Weather Radar, X-Band Phased-Array Radar, Three-Dimensional Wind Field

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

近年来,在全球变暖背景下,强对流天气呈多发频发态势。湖州地处浙江北部,位于天目山脉与杭嘉湖平原过渡带,地形复杂,易出现强对流天气。其中,短时强降水作为强对流天气的重要类型之一,虽然生命史较短,但具有突发性强、局地性明显、降水效率高的特点,易造成突发的城市内涝、山体滑坡和泥石流等灾害,对人民群众的生命财产安全造成严重威胁[1]-[4]。

强对流天气多发生在强的天气尺度强迫下[5]-[8]。但夏季,在前期高能高湿的背景下,也很容易出现弱天气尺度动力强迫情形下的强对流过程,常伴有局地短时强降水,此类对流大多是由边界层辐合以及地形抬升直接触发的。对于此类降水过程,现在的预报服务中依旧存在起止时间预报不准确、预报量级不好把握等共性问题。本文将基于多源观测资料对2024年湖州一次暖区短时强降水过程进行分析,探究弱天气尺度强迫背景下短时强降水天气的可预报性,为此类事件的预报预警提供参考。

2. 天气实况

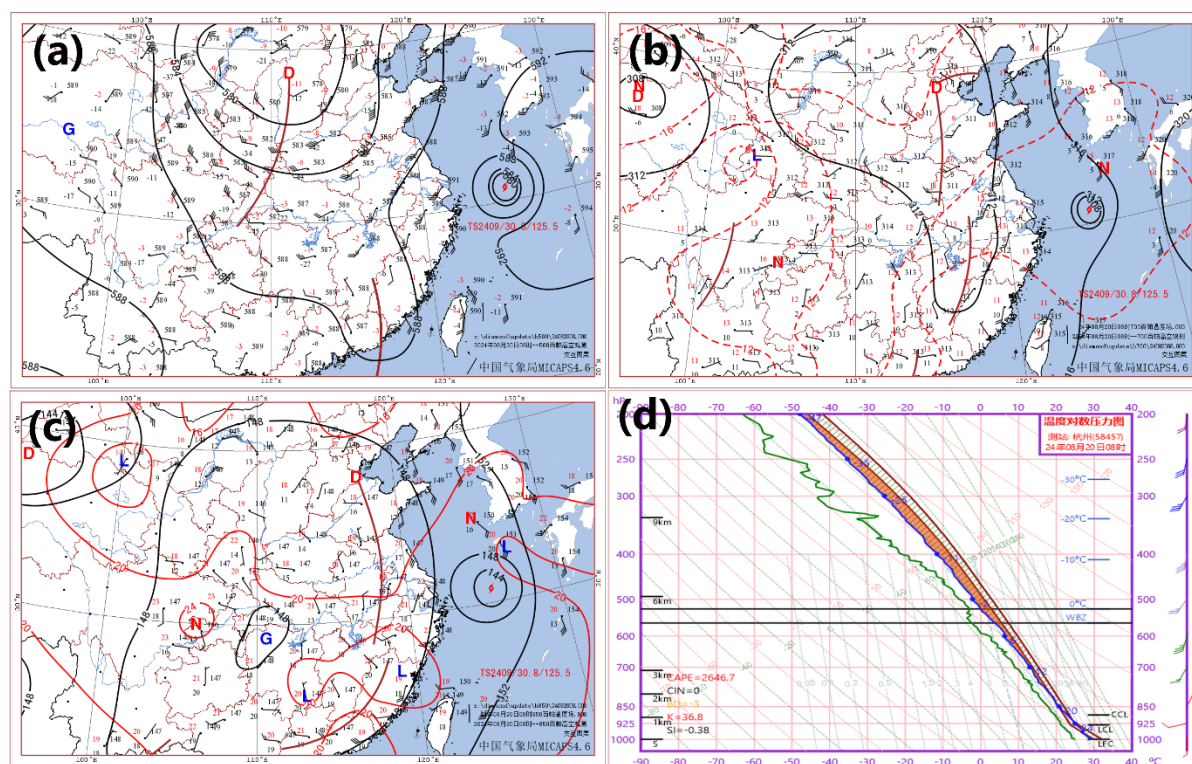
2024年8月20日中午起,湖州出现了一次雷阵雨天气过程,强天气主要落区在安吉、长兴以及吴兴区部分地区,以短时强降水为主。大暴雨中心位于长兴东北部和安吉西南部,过程最大单站降雨量为

安吉下汤村站 138.6 mm, 100 mm 以上的站点 9 个, 50 mm 以上的站点超 50 个, 最大小时雨强出现在长兴画溪街道徐家浜村站, 达 $87.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 18 个站小时雨强超 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此次过程具有局地性强、雨强大、持续时间较长的特征。

3. 环流背景和环境条件

图 1(a)~(c)显示, 8 月 20 日 8 时(对流发展前), 500 hPa 冷涡中心位于山西北部, 冷涡南侧低槽为东北西南走向, 延伸至重庆, 湖州位于槽前, 588 线附近。700 hPa 河北至安徽西北部有槽, 安徽至江西一带有切变线。850 hPa 山东至江西北部、福建至广东有切变线。湖州位于冷涡槽前、副高边缘, 切变线暖区一侧, 具有一定的动力抬升条件。此外, 中层至低层均受西南气流控制, 暖湿气流强盛, 水汽充沛。这是一次槽前暖区强天气过程, 此类环流型下的强对流天气常伴有短时强降水和雷暴大风。

根据对流发展前湖州城市站的最高气温(32°C)以及相应的露点温度(26°C)对 20 日 8 时的杭州站探空进行订正(图 1(d))。订正后的对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)高达 $2646.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且呈瘦长型, K 指数为 36.8°C , 极有利于短时强降水的发生。此外, 湿层深厚、垂直风切变较小、暖云层较厚(抬升凝结高度至 0°C 层高度约 4 km), 这意味着强对流发生时进入云中的水汽不易蒸发, 对应着较大的雨强以及较高的降水效率。对流抑制能量(Convective Inhibition, CIN)为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此只需要较弱的抬升即可触发对流。综上, 20 日白天整层大气高能高湿, 非常有利于强对流的发生与发展, 并可能伴有短时强降水。



注: 来源 MICAPS4.8 软件出图; 图(a)~(c)基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4616 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Synoptic charts at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa (d), and corrected Hangzhou (58457) sounding chart for 08:00 on August 20th, 2024

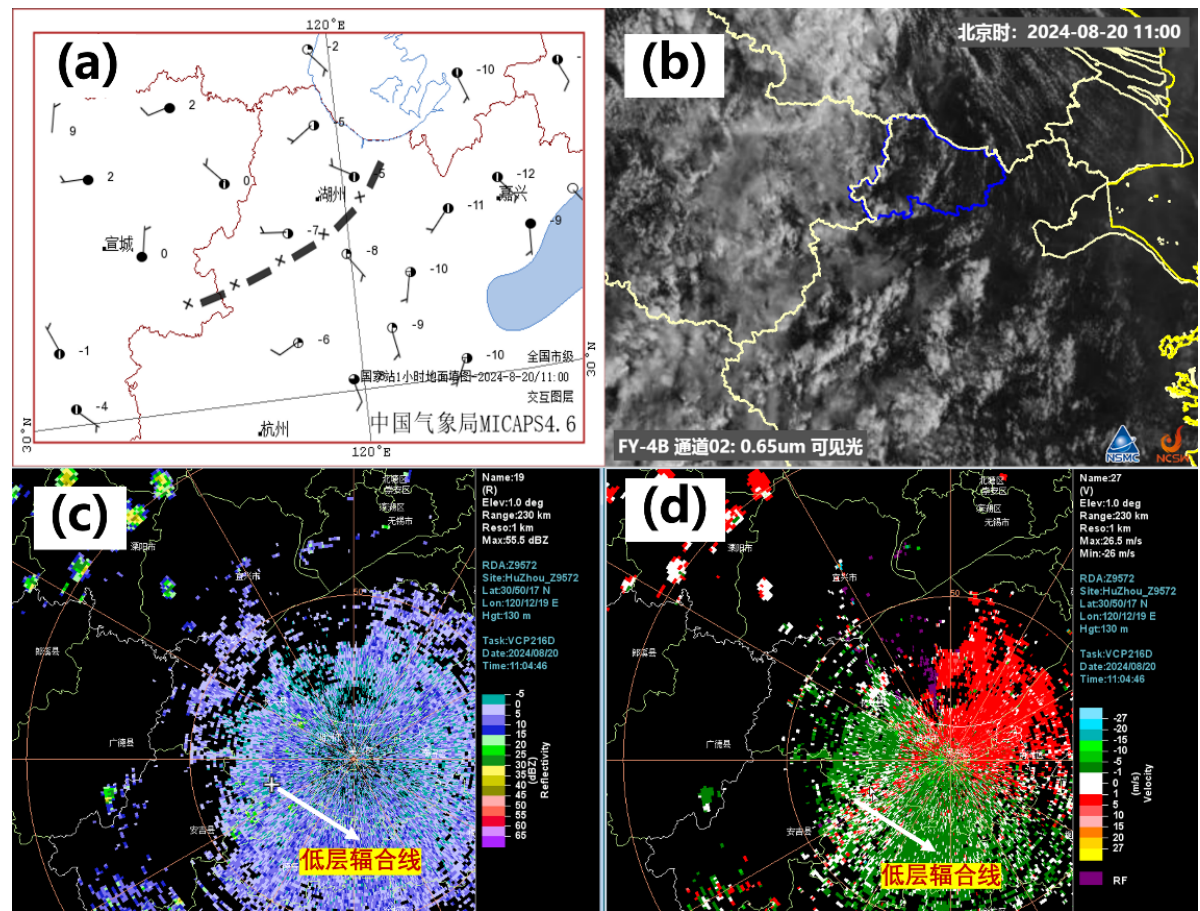
图 1. 2024 年 8 月 20 日 8 时(a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850 hPa 形势场, (d) 杭州站(58457)订正探空图

4. 中尺度触发与对流演变机制

本次局地强降雨是一次槽前暖区背景下的强天气过程，在对流发生前低层往往高能高湿，只需要较弱的强迫抬升即可触发对流。而这类天气形势配置中，需要格外关注中小尺度系统。

4.1. 对流触发——边界层辐合与地形抬升

11 时(强降雨发生前)，925 hPa 切变线位于山东至江西一带，湖州仍位于切变线东侧，受西南气流控制(图略)。分析地面场发现，由于低层浅薄冷空气渗透，长兴吴兴边界至安吉西南山区已形成东北-西南向的地面中尺度辐合线。结合同时刻的雷达低仰角反射率因子与径向速度，上述区域存在明显的窄带回波以及径向速度辐合，并且在辐合线上可见东北-西南向的中小尺度弧状云，弧状云与雷达图上的窄带回波及地面中尺度辐合线位置存在较好的对应关系(图 2)。11 时 22 分，雷达回波监测到辐合线附近的新生对流。12 时，受地面辐合线与地形抬升的共同作用，广德与安吉交界处触发了对流。研究表明，高分辨率气象卫星云图可以用来判断雷暴的初生，相较于根据雷达回波确认对流的初生可提前 10 至 30 分钟[9]。在弱天气尺度强迫背景下的强对流天气临近预报中，强化基于多源观测资料对中小尺度系统的监测识别有利于提高预警时效性。



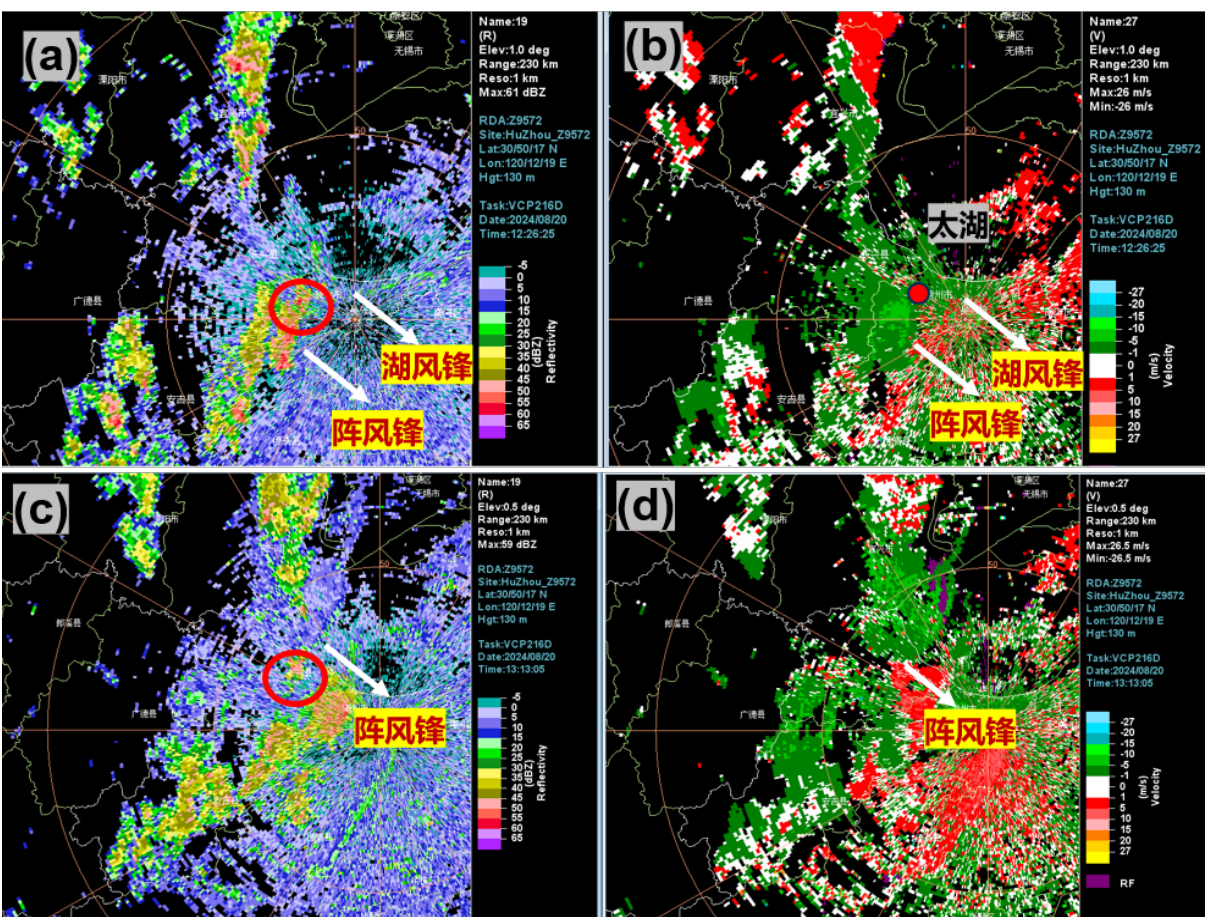
注：图(a)来源于 MICAPS4.8 软件出图，图(b)来源风云地球网页截图，图(c)-(d)来源于 ROSE3.0 软件截图；该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4616 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. (a) Surface map, (b) Visible satellite map at 11:00 on August 20th, 2024; Huzhou Doppler dual-polarization weather (c) Radar reflectivity factor and (d) Velocity at 1.0° elevation at 11:04

图 2. 2024 年 8 月 20 日 11 时(a) 地面图、(b) 可见光云图，11 时 04 分湖州多普勒双偏振雷达 1.0°仰角(c) 反射率因子、(d) 径向速度

4.2. 对流的发展与维持

张涛等[10]研究发现阵风锋对后侧雷暴主体的发展和维持起到一定作用。此外,在某些情形下,阵风锋对雷暴的新生具有触发作用[11]。11时45分,最初发展的对流单体产生了阵风锋(图略),在其向东南方向移动的过程中,不断触发新的对流单体。12时26分,向内陆推进的湖风锋与向东南移动的阵风锋相遇,触发新的对流单体(图3(a),图3(b))。13时13分,江苏宜兴对流前侧的阵风锋向东南方向移动,扫过长兴东部的对流单体,促使该单体迅速发展(图3(c),图3(d))。



注:来源 ROSE3.0 软件截图;该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4616 号的标准地图制作,底图无修改。

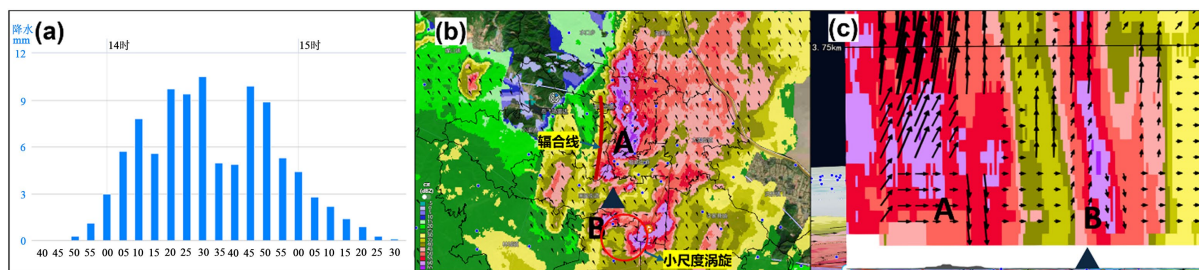
Figure 3. (a) Radar reflectivity factor and (b) velocity at 1.0° elevation angle at 12:26; (c) reflectivity factor and (d) velocity at 0.5° elevation angle at 13:13 on August 20th, 2024

图 3. 2024 年 8 月 20 日 12 时 26 分 1.0°仰角(a)基本反射率和(b)径向速度; 13 时 13 分 0.5°仰角(c)基本反射率和(d)径向速度

在安吉西南山区,风暴整体向东北方向移动的过程中,对流单体发生合并加强,并且在移动方向的后侧不断地有新单体生成。首先,降水使得该地产生冷池,而在风暴的后方(西南侧),低层依旧盛行西南暖湿气流,二者相遇触发新的对流。此外,13时至16时安吉与安徽交界至杭州一带存在切变线,使得上述区域不断触发新对流。“后向传播”叠加弱的引导气流,使得风暴整体移动缓慢,甚至出现准静止状态,从而导致强回波在安吉西南山区滞留长达3小时以上,致使多个站点出现100 mm以上的累计雨量。17时,安吉西南山区上空转为偏北气流,过程趋于结束。

4.3. 极端降水风暴结构的精细化分析

基于 X 波段相控阵雷达的双偏振参量以及三维风场反演结果, 对经过雨强极值点(徐家浜村站)的强风暴进行精细化结构分析(图 4)。在动力特征方面(图 4(b)), 多单体风暴西侧东北风与环境风之间形成了南北走向的风向辐合线, 此外, 风暴 B 低层风场呈气旋式旋转, 随后逐渐发展成为小尺度涡旋并维持近一小时。低层辐合线和发展的低尺度涡旋共同促进了风暴 B (即造成徐家浜站出现极端雨强的风暴)的低层辐合与上升运动, 有利风暴的进一步发展。13:55 的 X 波段雷达反射率因子和三维反演风场经向剖面显示(图 4(c)), 风暴 B 中心及前侧整层存在较强的斜升气流, 风暴后侧中下层则对应气流下沉区域。这种上升气流与下沉气流互不重叠的倾斜配置, 有效避免了降水粒子下落对上升气流的拖曳和抑制作用。因此, 该风暴在向北缓慢移动的过程中得以持续发展增强, 并在经过徐家浜站时出现准静止特征。在微物理结构方面(图略), 风暴的强反射率因子核(大于 50 dBZ)较低(2~3 km), 结合当天较高的湿球零度高度(5 km 左右)推断其拥有深厚的暖云层。此外, 差分反射率因子(Different Reflectivity Factor, Z_{DR})中心最大强度达到 4~5 dB, 差分传播相移率(Specific Differential Phase, K_{DP})中心强度超过 $3^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, 意味着该对流云团产生的是高浓度大雨滴, 具有较高的降水效率。



注: 图(a)来源于浙江省市县一体化平台出图, 图(b)~(c)来源于湖州市相控阵天气雷达监测预警系统截图。

Figure 4. (a) Rainfall evolution at Xujiabang Station for every 5 minutes from 13:35 to 15:30 and (b) 1 km height X-band phased array radar network reflectivity factor and retrieved wind field at 13:45, and (c) Radial vertical profiles of radar reflectivity factor and retrieved wind field along the east-west direction of Xujiabangcun station at 13:55 (colored as X-band phased array radar reflectivity factor; arrows as retrieved wind field; black triangles as the location of Xujiabangcun Station)

图 4. 2024 年 8 月 20 日(a) 13:35~15:30 徐家浜站雨量逐 5 分钟演变, (b) 13:45 1 km 高度 X 波段相控阵雷达组网反射率因子和反演风场, (c) 13:55 雷达反射率因子和反演风场沿徐家浜村站的经向垂直剖面(填色为 X 波段相控阵雷达反射率因子; 箭头为反演风场; 黑色三角形为徐家浜站位置)

5. 小结

本次暖区暴雨过程关键参数总结如表 1 所示, 具体总结如下:

(1) 2024 年 8 月 20 日湖州短时强降水是一次冷涡槽前暖区暴雨过程。动力抬升条件较差, 但极高的不稳定能量与异常深厚的湿区为短时暴雨的发生提供了极其有利的条件。

(2) 中尺度触发机制是决定对流发生地点和时间的关键。这与许爱华等[12]对我国中东部强对流天气的研究结论一致, 即在斜压性较弱的环流背景下, 地面辐合线是主要的触发机制。在本次过程中, 边界层辐合线和地形抬升共同作用触发了初始对流, 而高分辨率卫星云图对此次对流初生的监测具备一定的提前量, 可为短临预报提供重要的参考依据。本次湖州过程在局地环流影响及风暴维持机制上表现出独特的特征, 即太湖水体的热力性质差异对局地环流的影响——源自太湖的偏北气流(湖风锋)西南气流(环境风)及风暴流出(阵风锋)在湖州北部交汇, 进一步更加强了低层辐。这一机制可能是本次湖州个例区别于纯内陆地区暖区暴雨的独特之处, 提示我们在太湖周边城市的预报中, 需重点关注水体对局地对流系统的触发与维持作用。

Table 1. Key parameters of the warm-sector heavy rainfall event on August 20, 2024 in Huzhou
表 1. 2024 年 8 月 20 日湖州暖区暴雨过程关键参数总结

参数类别	环境参数	数值/特征	指示意义
环境条件	对流有效位能	2646.7 J·kg ⁻¹	大气层结极不稳定
	K 指数	36.8℃	有利于短时强降雨
	可降水量	>60 mm	水汽条件异常好
	0~6 km 垂直风切变	<10 m·s ⁻¹	风暴移速慢
触发机制	中尺度系统	边界层辐合线、地形抬升	对流初始触发
		阵风锋、湖风锋	对流发展与新生
风暴特征	风暴结构	上升与下沉气流倾斜配置	利于风暴维持增强
	微物理特征	暖云层厚度 4 km、ZDR 4~5 dB、KDP 大于 3°·km ⁻¹	高降水效率
	动力特征	低层小尺度涡旋	增强低层辐合与上升运动

(3) 此次过程中导致单站出现极端雨强的强风暴低层存在小尺度涡旋，上升与下沉气流的倾斜配置，使风暴持续增强；强回波核集中在 2~3 km、深厚暖云层和双偏振参量 Z_{DR}、K_{DP} 的高值区，共同指示高浓度大雨滴的高效降水过程。多波段雷达对风暴动力与微物理特征的高时空分辨率监测为判断风暴是否会加强维持以及雨强预估具有重要的指示意义。

基金项目

湖州市公益性应用研究项目“面向低空飞行的三维风场反演融合技术及应用研究”(2025GY062)。

参考文献

[1] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.

[2] 张俊兰, 李伟, 郑育琳. 昆仑山北坡短时强降水天气分型及雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(1): 1-9.

[3] Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F., Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., *et al.* (2021) Anthropogenic Intensification of Short-Duration Rainfall Extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, **2**, 107-122.
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>

[4] Yuan, W., Tu, X., Su, C., Liu, M., Yan, D. and Wu, Z. (2021) Research on the Critical Rainfall of Flash Floods in Small Watersheds Based on the Design of Characteristic Rainfall Patterns. *Water Resources Management*, **35**, 3297-3319.
<https://doi.org/10.1007/s11269-021-02893-5>

[5] Doswell, C.A. (1987) The Distinction between Large-Scale and Mesoscale Contribution to Severe Convection: A Case Study Example. *Weather and Forecasting*, **2**, 3-16. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1987\)002<0003:tdblsa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0003:tdblsa>2.0.co;2)

[6] 郝莹, 姚叶青, 郑媛媛, 等. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象, 2012, 38(8): 903-912.

[7] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(6): 498-506.

[8] 吴照宪, 罗亚丽, 刘希, 等. 2011-2018 年安徽暖季短时强降水及其环流背景统计特征[J]. 气象, 2022, 48(8): 963-978.

[9] 覃丹宇, 方宗义. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J]. 气象, 2014, 40(1): 7-17.

[10] 张涛, 李柏, 杨洪平, 等. 三次雷暴导致的阵风锋过程分析[J]. 气象, 2013, 39(10): 1275-1283.

[11] 王晓娟, 邓荣耀, 陈三春. 四川盆地一次阵风锋触发的局地强对流天气雷达特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(2): 62-66.

[12] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400-411.