

基于新型垂直遥感地基观测的舟山一次梅雨期强对流演变及临近预警指示

孙小淞, 姚昊昕, 陈淑琴*, 邱璟怡, 刘 菡, 冀 蕊

舟山市气象局, 浙江 舟山

收稿日期: 2026年8月16日; 录用日期: 2026年9月15日; 发布日期: 2026年9月23日

摘 要

为揭示海岛地区梅雨期强对流的垂直结构及其临近监测特征, 综合利用S波段天气雷达、毫米波云雷达、激光测风雷达、微波辐射计和自动气象站资料, 对2026年7月3日舟山强对流过程进行分析。结果表明: 影响嵊泗的对流单体组织性较强, 具有钩状回波、V形缺口和高回波顶等特征, 低层强降水持续约20 min, 并产生23.4 m/s的雷暴大风; 影响定海的对流系统瞬时强度相对较弱, 但2 km以下降水回波持续约55 min, 累计降水量达54.9 mm, 表现出更显著的持续性强降水特征。毫米波云雷达清晰地记录了中高层水凝物增长、降水回波柱向下建立、混合相粒子发展及低层降水减弱的演变过程。激光测风雷达观测到低层上升运动向强下沉气流转变, 以及高水平风速区向近地层传播, 并与地面风速突增、降温 and 气压上升基本同步。低层风向转换、垂直风切变、近地层暖湿条件和高风速区下降对强对流临近监测具有一定指示意义。多源垂直遥感资料能够有效补充天气雷达对云微物理和边界层动力结构的观测, 但强降水期间毫米波衰减及反演误差仍需结合多源资料综合识别。

关键词

梅雨期强对流, 垂直遥感观测, 毫米波云雷达, 激光测风雷达, 微波辐射计, 临近监测

Examining the Evolution and Nowcasting Warning Indications of a Meiyu-Season Severe Convection over Zhoushan Using Novel Ground-Based Vertical Remote Sensing Observations

Xiaosong Sun, Haixin Yao, Shuqin Chen*, Jingyi Qiu, Han Liu, Rui Ji

*通讯作者。

文章引用: 孙小淞, 姚昊昕, 陈淑琴, 邱璟怡, 刘菡, 冀蕊. 基于新型垂直遥感地基观测的舟山一次梅雨期强对流演变及临近预警指示[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(5): 1071-1081. DOI: 10.12677/ccr.2026.155114

Abstract

To reveal the vertical structure of Meiyu-season severe convection over the island region and its nowcasting monitoring characteristics, the severe convection event over Zhoushan on July 3, 2026 was analyzed by integrating data from an S-band weather radar, a millimeter-wave cloud radar, a wind lidar, a microwave radiometer, and automatic weather stations. The results show that the convective cell affecting Shengsi was well organized, exhibiting a hook echo, a V-shaped notch, and a high echo top; low-level heavy precipitation lasted approximately 20 min and produced a thunderstorm gale of 23.4 m/s. The convective system affecting Dinghai was relatively weaker in instantaneous intensity, yet precipitation echoes below 2 km persisted for about 55 min with an accumulated precipitation of 54.9 mm, indicating more pronounced persistent heavy precipitation. The millimeter-wave cloud radar clearly documented the evolution of hydrometeor growth in the middle and upper levels, the downward establishment of precipitation echo columns, the development of mixed-phase particles, and the weakening of low-level precipitation. The wind lidar observed the transition from low-level updrafts to strong downdrafts, as well as the downward propagation of high wind speed regions toward the surface layer, which was roughly synchronized with the abrupt increase in surface wind speed, temperature drop, and pressure rise. Low-level wind direction shifts, vertical wind shear, warm and moist conditions in the near-surface layer, and the descent of high wind speed regions provide an indicative value for the nowcasting monitoring of severe convection. Multi-source vertical remote sensing data can effectively supplement weather radar observations of cloud microphysics and boundary-layer dynamic structure; however, millimeter-wave attenuation and retrieval errors during heavy precipitation still require comprehensive identification in combination with multi-source data.

Keywords

Meiyu-Season Severe Convection, Vertical Remote Sensing, Millimeter-Wave Cloud Radar, Wind Lidar, Microwave Radiometer, Nowcasting Monitoring

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

梅雨期是我国长江中下游地区暴雨和强对流天气集中发生的主要时段。与典型大陆强对流相比，舟山海岛地区梅雨期暴雨过程具有低层暖湿层深厚、云体降水质心偏低、暖云降水效率高等特征。

近年来，毫米波云雷达、激光测风雷达、风廓线雷达和微波辐射计等高时空分辨率地基遥感设备逐渐应用于云降水物理和强对流临近监测[1]。毫米波云雷达对小云滴和冰晶较为敏感，可连续获得云底、云顶、反射率因子、径向速度及速度谱宽等垂直廓线，为研究云体增长、降水粒子形成和混合相态演变提供观测依据。王卫民等利用 Ka 波段云雷达分析不同类型降水回波，表明毫米波云雷达能够细致刻画云降水的时间-高度结构[2]。在毫米波云雷达对多层云及混合相云的观测应用中，Tridon 等人建立了一套基于云顶瑞利散射特性的差分路径积分衰减估算框架，为从地基多频雷达数据中精确反演云微物理结构

提供了稳健的校正依据[3]。激光测风雷达能够提供边界层水平风和垂直速度的连续观测,有利于识别低层风向转换、垂直风切变、上升运动及高风速区向低层传播等特征。

风廓线雷达与云雷达联合应用还可在一定程度上分离空气垂直运动和降水粒子末速度,降低将水凝物下落速度误认为空气下沉运动的风险[4]。风廓线雷达的数据获取率存在明显的季节、月际及降水差异,其在夏季、大雨条件下探测性能更优[5]。钟倩媚等利用风廓线雷达对粤东莲花山脉地形下强降水的研究指出,低空急流、垂直风切变的演变以及低空急流指数可作为复杂地形季风强降水短临预警的重要动力诊断指标[6]。微波辐射计则能够以分钟级时间分辨率反演温度、湿度、水汽密度和积分水汽量,并计算K指数等稳定度参数[7],但容易受到周边环境的影响从而带来误差,如降水、天线罩上附着的水、天空中的云等[8]。Foth等人通过调整频率和仰角来减少降水天气对温度廓线的影响[9]。微波辐射计与风廓线雷达的组合能够分析水汽的辐合辐散,分析结果可以显示对流性暴雨在中低层在干冷空气侵入后形成的干冷层[10]。

近年来,舟山市逐步建设新型地基垂直遥感观测网(图1),观测设备分布于嵊泗、岱山、定海和普陀等地。2026年7月3日舟山出现一次梅雨期强对流,伴短时强降水、雷电和冰雹。利用多源地基垂直遥感资料,分析对流系统结构差异及其动力-微物理演变特征,并识别关键预警信号的提前量,评估其在海岛暴雨临近监测中的应用潜力。



Figure 1. Locations and schematic of the novel ground-based vertical remote sensing observation instruments in Zhoushan
图 1. 舟山市新型垂直遥感地基观测设备及位置示意图

2. 过程风雨概况

2026年7月3日14时~22时(北京时,下同),舟山地区受强对流影响,多个站点出现雷暴大风和短时强降水,局部伴有冰雹。全市有11站超过50mm,其中最大为定海双桥站,小时雨强达76.8mm。全市面雨量17.8mm,其中定海区29.6mm,普陀9.6mm,岱山10mm,嵊泗9.8mm,19时~20时30分为最强降水时段。

S波段雷达0.5°仰角反射率显示(图2、图3),影响嵊泗的为直径约30km的超级单体。3日19时16分S波段雷达0.5度仰角显示存在钩状回波特征。垂直剖面可以见V形缺口。东北西南走向,移速44km/h。最高顶高17.7km。影响定海的对流系统较影响嵊泗的弱。3日19时10分S波段雷达0.5°仰角显示回波最强反射率为59.5dbZ。

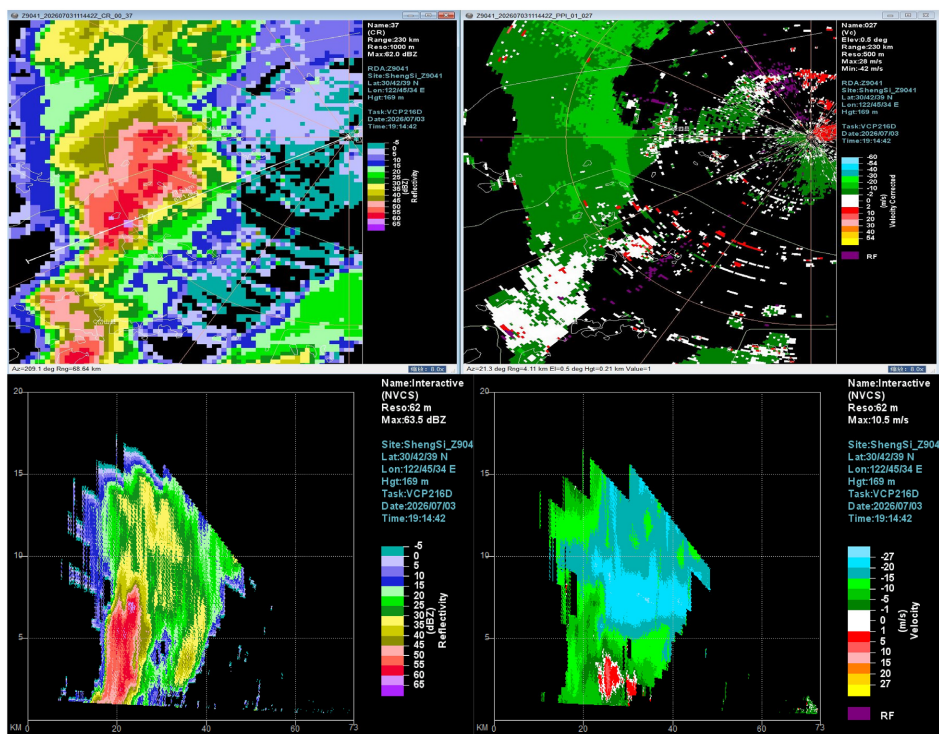


Figure 2. S-band radar observations at 19:16 on July 3, 2026: (a) PPI radar reflectivity at 0.5° elevation; (b) velocity; (c, d) vertical cross-sections of radar reflectivity and velocity along the white line in (a)

图 2. S 波段雷达 2026 年 7 月 3 日 19 时 16 分 (a) PPI 0.5° 仰角雷达反射率; (b) 速度; (c, d) 沿 a 中的白色线的垂直剖面对应的雷达反射率和速度的垂直剖面

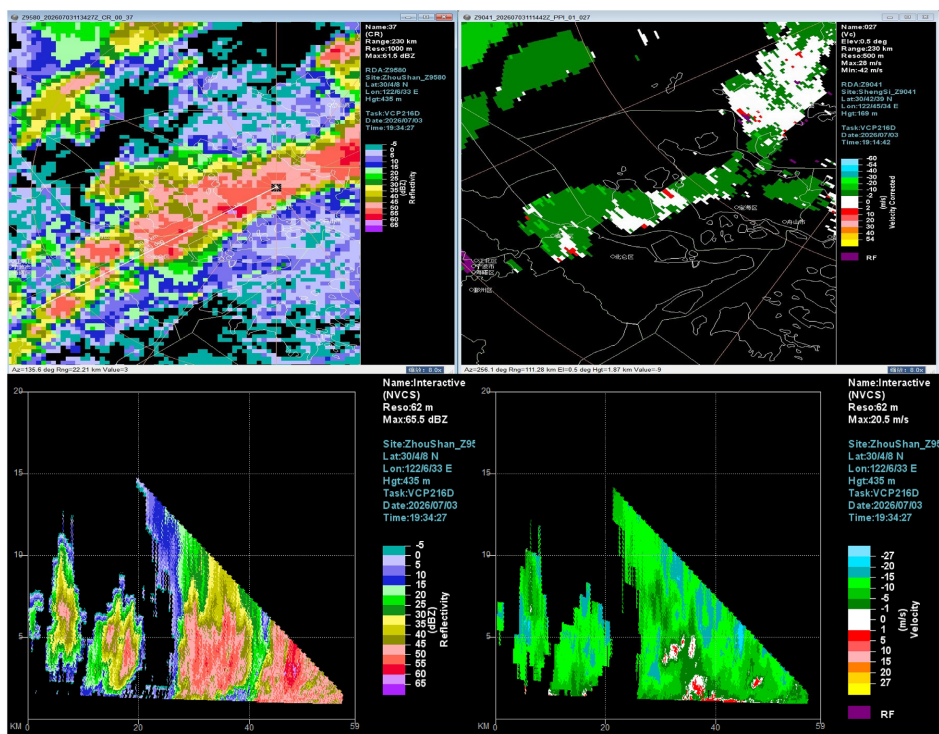


Figure 3. As in Figure 2, but for 19:34

图 3. 同图 2, 但为 19 时 34 分

3. 多源垂直遥感地基观测特征

2026 年 7 月 3 日 18:30~20:30, 嵊泗毫米波云雷达较完整地观测到强对流单体过站前后的垂直结构演变(图 4)。

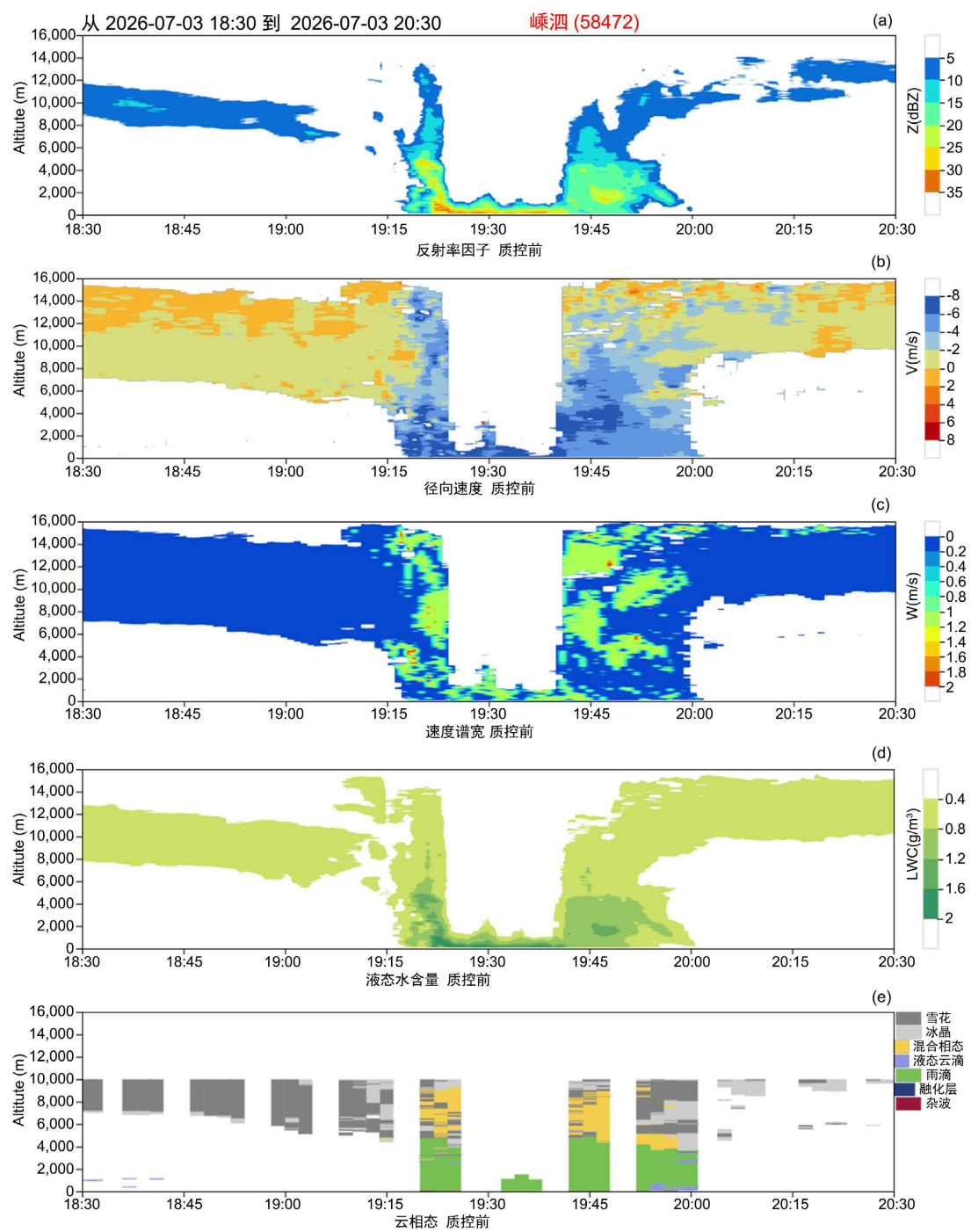


Figure 4. Shengsi millimeter-wave cloud radar observations from 18:30 to 20:30 on July 3, 2026 (0~18 km): (a) reflectivity factor; (b) radial velocity; (c) spectral width; (d) liquid water content; (e) cloud phase

图 4. 2026 年 7 月 3 日 18 时 30 分~20 时 30 分 0~18 km 嵊泗毫米波云雷达 (a) 反射率因子 (b) 径向速度 (c) 速度谱宽 (d) 液态水含量 (e) 云相态

18:30~19:15, 测站上空以中高层云体为主, 云体主体位于 8~14 km, 反射率因子主要为 0~14 dBZ。随着时间推移, 云体下边界由约 7~8 km 逐渐下降至 5~6 km, 表明中高层冰相粒子不断增长并向下沉降, 云体垂直厚度增加。液态水含量主要分布在云体中下部, 总体低于 1 g/m^3 。云相态显示, 6 km 以上以冰晶、雪花等固态水凝物为主, 固态粒子层下边界逐渐由约 6 km 降低至 5 km 附近, 而 2 km 以下基本未出现连续雨滴信号。速度谱宽整体较小, 表明云内粒子径向速度分布相对集中, 水凝物沉降速度差异和小尺度动力扰动相对有限。

19:15 以后, 云体垂直结构发生快速调整。约 5 min 内, 强反射率回波由中层迅速向下扩展至近地面, 形成连续的降水回波柱, 局地反射率因子达到 26~32 dBZ, 表明云内较大粒子快速增长并到达低层。与此同时, 2 km 以下液态水含量明显增加, 局地达到 2.07 g/m^3 , 反映低层液态降水粒子浓度显著增大。

19:20~19:25, 此时云团还未明显下降, 高层反射率还未被衰减, 能完整探测 0~16 km 的单体云微物理结构, 反射率上形成明显的强回波柱, 达到 34 dBZ。云相态显示, 约 4~5 km 以下以雨滴为主, 5~9 km 为冰、雪、霰和过冷水可能共存的混合相层, 更高层则以冰晶和雪花等固态水凝物为主, 呈现较为清晰的垂直相态分层。速度谱宽在深厚云体内明显增大, 说明雷达采样体积内粒子径向速度离散程度增加。

19:20~19:40, 低层强回波持续存在, 强降水持续约 20 分钟, 嵊泗邻近自动站累计降水量为 17.2 mm, 最大小时雨强为 26.1 mm, 小时极大风速为 23.4 m/s, 其与低层强回波持续时间具有较好对应关系。19:40~20:00, 4 km 以下仍存在相对较弱的降水回波, 液态水含量降至 0.35 g/m^3 , 说明地面降水逐渐减弱。20:00 以后, 回波主要分布在 8 km 以上, 中低层连续降水粒子柱基本消失, 可能对应对流单体后部的冰云或砧状云残留。

总体而言, 嵊泗毫米波云雷达清晰地记录了从高层冰相粒子增长、降水回波柱向下建立, 到低层强降水形成并最终减弱的演变过程。

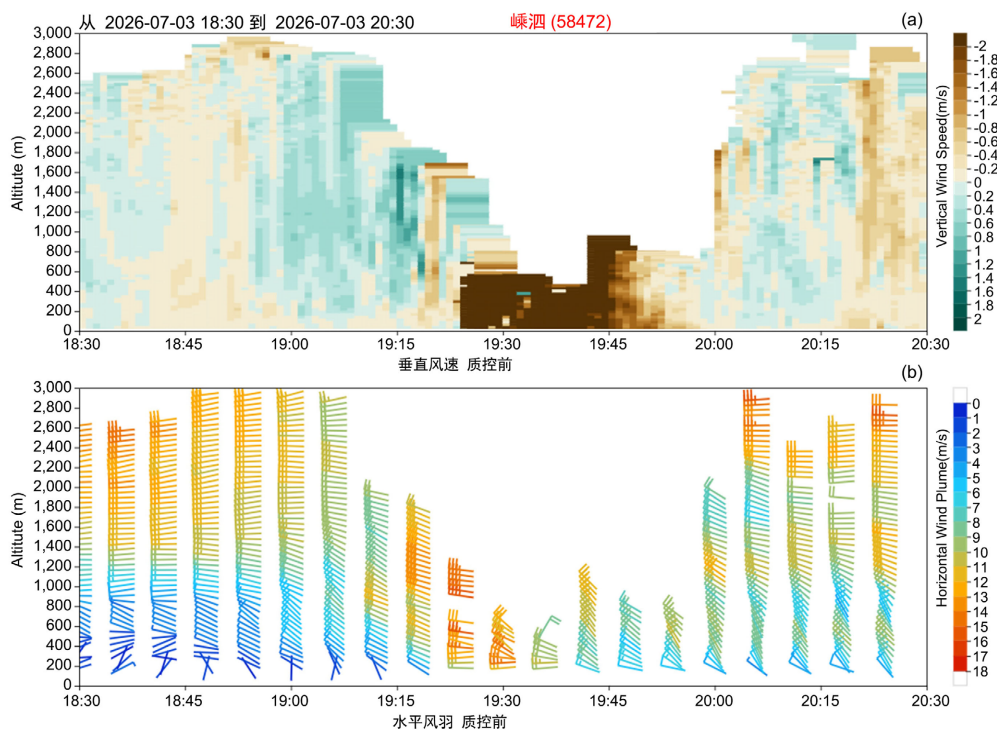


Figure 5. Shengsi wind lidar observations from 18:30 to 20:30 on July 3, 2026 (0~3 km): (a) vertical wind speed; (b) horizontal wind barbs

图 5. 2026 年 7 月 3 日 18 时 30 分~20 时 30 分 0~3 km 嵊泗激光测风雷达 (a) 垂直风速 (b) 水平风羽

嵊泗激光测风雷达进一步揭示了强对流过站期间低层垂直运动和水平风场的演变(图 5)。18:30~19:15, 0~2.5 km 范围内正垂直速度区域逐渐扩展, 上升运动最低可延伸至 200 m 以下, 较强上升运动主要位于 0.8~1.2 km, 最大值约为 0.4 m/s。低层上升气流的持续增强, 与同期毫米波云雷达观测到的云体增厚和冰相粒子向下扩展相对应, 表明对流单体接近测站过程中, 边界层辐合抬升和对流上升运动逐渐加强。

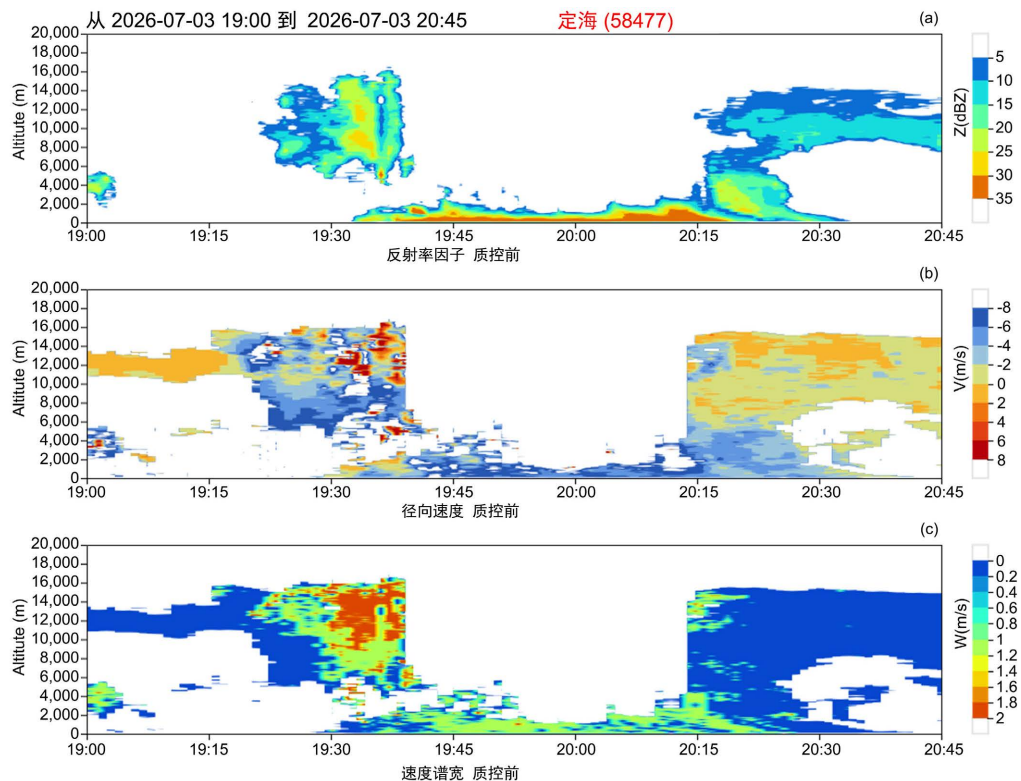
19:15~19:25, 近地层上升运动有所减弱, 而较强正垂直速度主要集中在 0.8~1.6 km, 其强度高于前一阶段。这可能表明上升气流核心逐渐抬升, 同时近地层开始受到降水拖曳和下沉气流影响。该阶段垂直速度随时间呈现正-负-正相间分布, 反映对流单体过站时上升和下沉运动分支交替出现, 可能与对流尺度涡旋、小尺度辐合辐散及降水粒子沉降共同有关。

19:25~19:40, 600 m 以下出现较连续的负垂直速度区, 局地负值可达约 $-9.8\sim-1.9\text{ g/m}^3$, 时间上与毫米波云雷达低层强回波以及地面强降水阶段基本一致, 可能反映降水拖曳和蒸发冷却共同作用下的低层下沉气流。同期地面白节站观测到风速突增、气温下降和气压上升(图不在此给出), 确认为下击暴流。

水平风羽显示(图 5(b)), 19:00~19:30 较大水平风速区的高度总体呈下降趋势, 并逐渐接近边界层低层。该现象与同期低层负垂直速度增强相配合, 支持对流云内较大水平动量随下沉气流向下输送的判断, 可以作为临近大风预报的信号特征之一。

定海毫米波云雷达于 19:00~20:45 观测到另一强降水系统的垂直演变过程(图 6)。与嵊泗过程相比, 定海对流的瞬时回波强度相对偏弱, 但低层降水回波持续时间更长。

19:20 前后, 定海上空高层回波逐渐发展, 云顶高度达到约 16 km, 随后降水回波向低层扩展。19:32~20:27, 2 km 以下持续存在降水回波, 持续时间约 55 min, 邻近自动站累计降水量为 54.9 mm, 小时极大风 15.3 m/s。



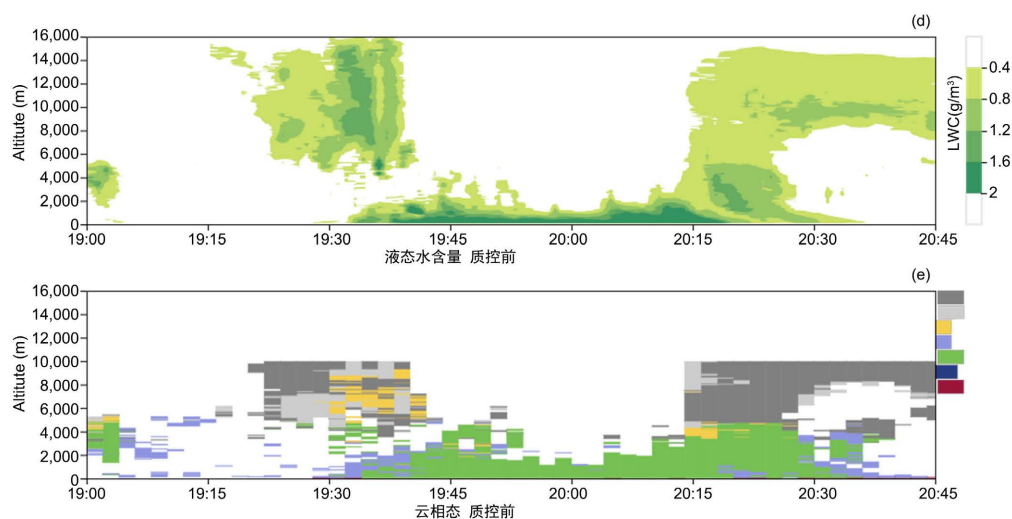


Figure 6. Dinghai millimeter-wave cloud radar observations from 19:00 to 20:45 on July 3, 2026 (0~18 km): (a) reflectivity factor; (b) radial velocity; (c) spectral width; (d) liquid water content; (e) cloud phase

图 6. 2026 年 7 月 3 日 19 时 00 分~20 时 45 分 0~18 km 定海毫米波云雷达 (a) 反射率因子 (b) 径向速度 (c) 速度谱宽 (d) 液态水含量 (e) 云相态

19:30~19:40, 垂直剖面中一度出现 0~2 km 和 4~16 km 两层回波, 而 2~4 km 回波明显偏弱或局部缺失。19:40~20:10, 中高层回波再次出现不同程度的减弱或缺测, 而 2 km 以下降水回波持续存在。该阶段更可能受到低层强降水衰减和遮蔽的影响。

4. 临近预警判断条件特征分析

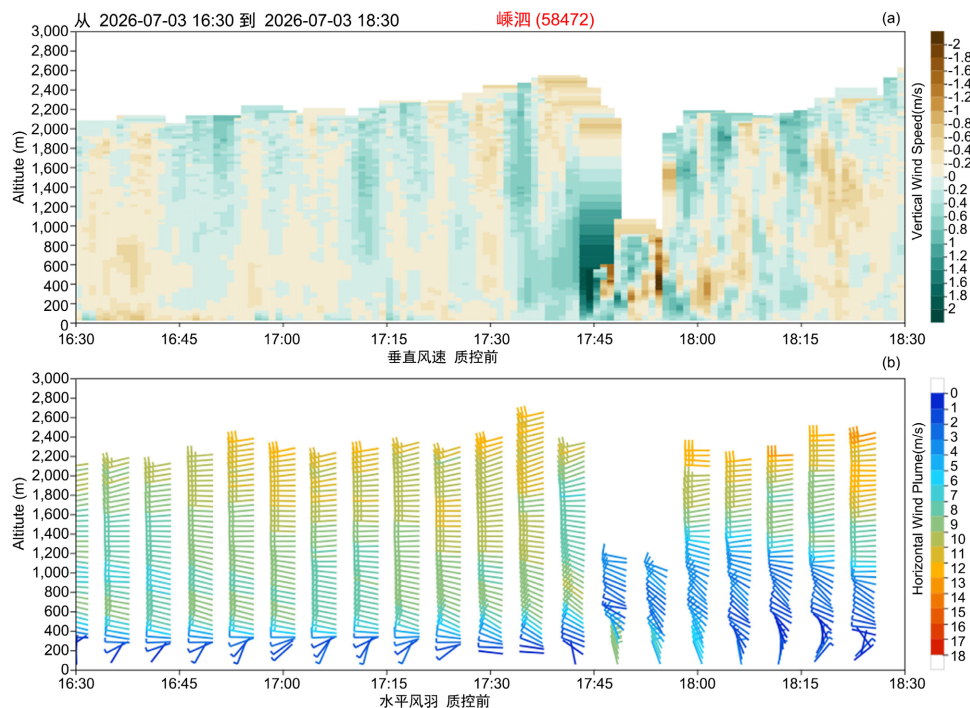


Figure 7. (a) Vertical velocity and (b) horizontal wind profiles observed by the Shengsi doppler wind lidar from 16:30 to 18:30 LST on 3 July 2026 within the 0~3 km altitude range

图 7. 2026 年 7 月 3 日 16 时 30 分~18 时 30 分 0~3 km 嵊泗激光测风雷达的(a) 垂直风速; (b) 水平风羽

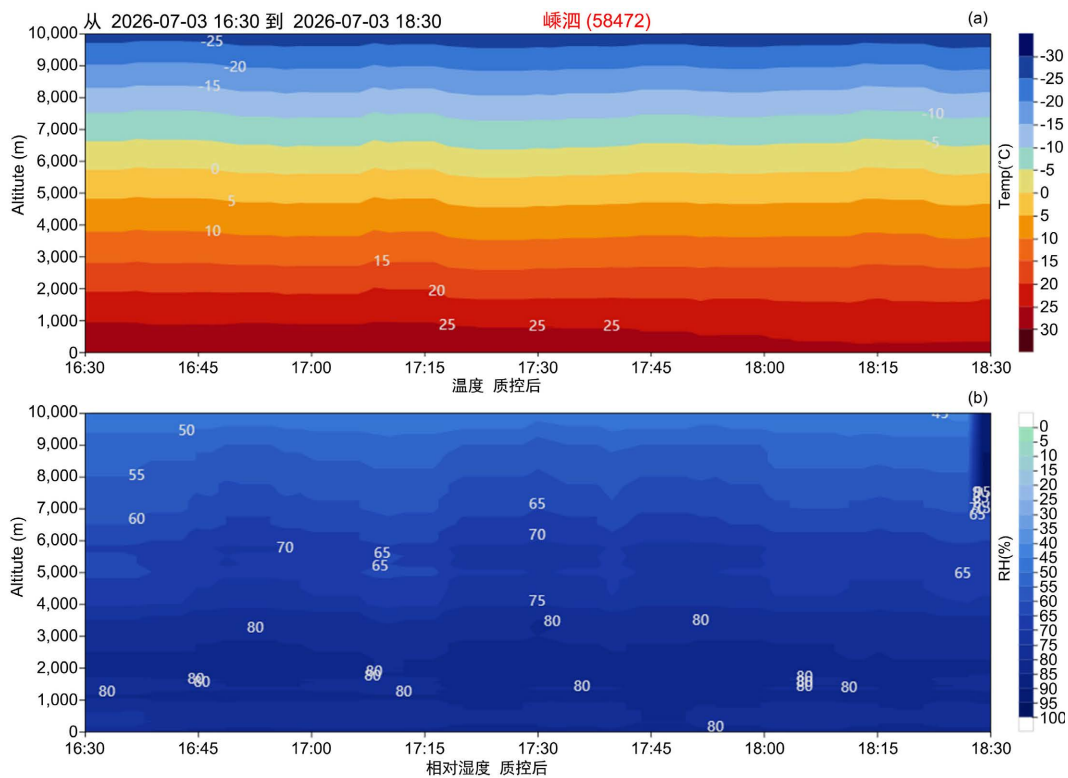


Figure 8. Shengsi microwave radiometer observations from 16:30 to 18:30 on July 3, 2026: (a) temperature (0~3 km); (b) relative humidity (0~16 km)
图 8. 2026 年 7 月 3 日 16 时 30 分~18 时 30 分嵊泗微波辐射计 (a) 0~3 km 温度 (b) 0~16 km 相对湿度

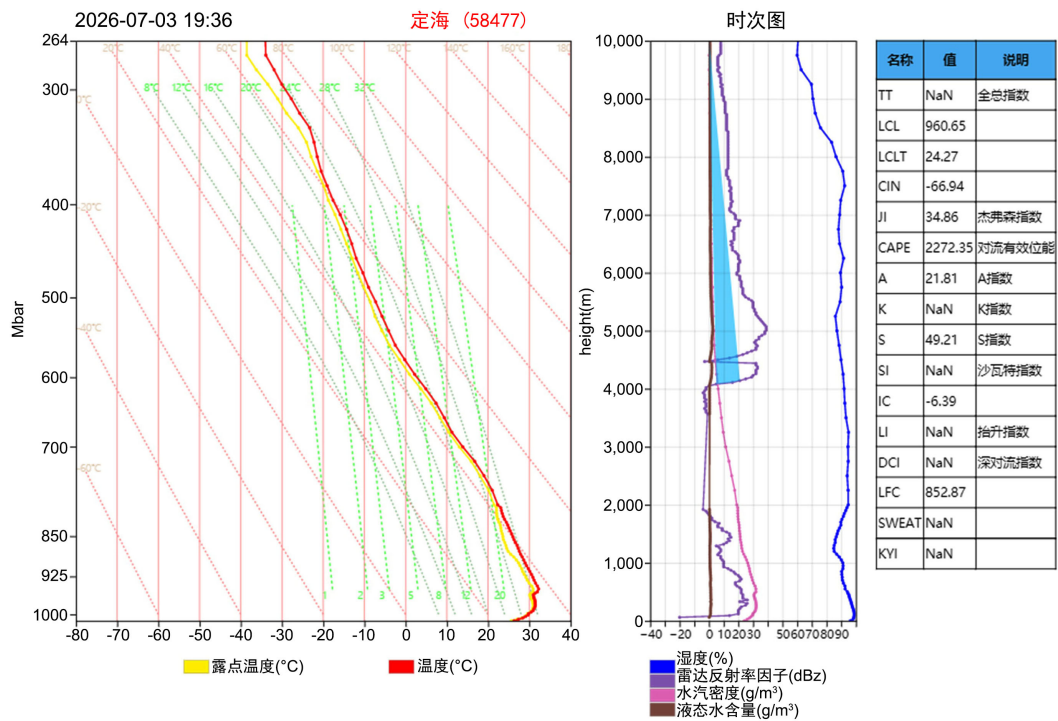


Figure 9. Retrieved elements and indices at the Dinghai station at 19:36 on July 3, 2026
图 9. 2026 年 7 月 3 日 19 时 36 分定海测站反演的要素与指数特征

嵊泗激光测风雷达显示(图 7), 对流系统接近前, 低层风向由西北风逐渐转为东北风, 表明边界层内存在明显的水平风向转换和低层切变。与此同时, 高、低层风向存在一定差异, 说明环境中具有较明显的垂直风切变。低层风向转换可能对应局地辐合区、海陆风边界或对流系统前侧出流边界的调整, 有利于近地层水汽和热量汇聚, 并可能为对流的触发或维持提供动力条件。

嵊泗微波辐射计观测显示(图 8), 对流发生前近地层维持较高温度和湿度, 为对流发展提供了较充足的水汽和热力条件。

定海微波辐射计反演结果显示(图 9), 近地面温度约为 26°C , 低层水汽密度约为 $18\sim 22\text{ g/m}^3$, 说明对流影响期间定海近地层处于暖湿状态。19:36, 对流有效位能 CAPE 达到过程最大值 2272.35 J/kg , 说明当时大气具有较强的不稳定能量。

5. 结论与讨论

5.1. 讨论

已有研究表明, 大陆强对流受地形与地表热力非均匀强迫更强, 垂直发展剧烈、组织性高、爆发性强, 多短时极端大风与强降水, 局地离散性显著。而海洋性对流下垫面热力均一、水汽补给稳定, 系统结构相对松散、演变平缓, 以持续性降水为主, 局地突发性扰动偏弱[11][12]。本研究中舟山梅雨期强对流在嵊泗与定海呈现显著分化。嵊泗对流单体组织性强、垂直发展旺盛, 致灾以短时雷暴大风为主。而定海对流回波偏弱但维持时间长, 以持续性强降水为特征。毫米波云雷达、激光测风雷达及微波辐射计等垂直遥感设备, 可刻画云微物理分层演变、边界层风场与温湿结构变化, 弥补传统观测对垂直结构调整的短板, 为海岛强对流动力-微物理耦合机理提供了精细化观测依据。

海岛海陆非均匀下垫面是本次对流分型演变的关键诱因, 海陆热力差异会在傍晚后形成辐合带, 为对流激发提供很好的抬升条件, 而舟山正好处在海陆交接位置, 极易受到入海回波加强影响。本研究也存在明显局限性, 比如强降水过程中毫米波云雷达存在信号衰减问题, 分层回波结构特征存在不确定性, 无法完全区分水凝物真实分布与观测质控误差。同时研究仅基于单个个例、少量站点观测, 所得临界动力、微物理监测指标缺乏统计检验与统一预警阈值, 普适性受限。后续研究需结合 S 波段雷达、地面雨量与湿度站点等实况数据订正云雷达观测偏差, 依托多典型个例统计分析, 系统评估各类观测指标的预警稳定性与提前量, 构建适配舟山海岛特殊下垫面的强对流综合临近预警指标体系, 进一步完善海陆过渡带梅雨强对流的监测预警理论与技术。

5.2. 结论

本文综合利用 S 波段天气雷达、毫米波云雷达、激光测风雷达、微波辐射计及自动气象站资料, 对 2026 年 7 月 3 日舟山梅雨期强对流过程进行了分析, 主要结论如下:

(1) 影响嵊泗和定海的对流系统具有明显差异。影响嵊泗的对流单体组织性较强, 具有钩状回波、V 形缺口和较高回波顶等特征, 低层强降水持续约 20 min, 并产生 23.4 m/s 的小时极大风速, 表现为短时、突发性强的雷暴大风过程。影响定海的对流系统瞬时回波强度相对偏弱, 但 2 km 以下降水回波持续约 55 min, 邻近站累计降水量达到 54.9 mm, 表现出更显著的持续性强降水特征。

(2) 毫米波云雷达较完整地记录了嵊泗对流单体由中高层水凝物增长、降水回波柱向下建立, 到低层强降水形成并逐渐减弱的过程。19:20~19:25, 云体内部呈现较明显的垂直相态分层, 混合相层内反射率因子和速度谱宽同步增大, 反映水凝物快速增长、粒子谱拓宽及云内动力扰动增强。

(3) 激光测风雷达观测到嵊泗强对流过站期间低层上升运动、强下沉气流和高水平风速区向低层传播的连续演变。19:25~19:40, 600 m 以下负垂直速度显著增强, 并与低层强回波、地面风速突增、气温下

降和气压上升基本同步,表明降水拖曳、蒸发冷却及水平动量下传可能共同促进了下击暴流的形成。

(4) 低层风向转换、垂直风切变增强、近地层暖湿条件、高风速区下降以及上升-下沉运动转换,均表现出一定的临近监测意义。与 S 波段天气雷达主要提供对流系统水平结构和整体演变不同,毫米波云雷达、激光测风雷达和微波辐射计能够以较高时间分辨率连续刻画单站上空的云微物理、边界层动力及温湿结构变化,为识别强降水和雷暴大风形成前后的垂直结构调整提供了补充信息。

毫米波云雷达在强降水条件下易受衰减影响,需结合 S 波段雷达、地面雨量及信噪比联合订正。个例中出现的分层回波结构仍存在不确定性,可能与真实水凝物非均匀分布或反演/质控误差有关。微波辐射计与风廓线雷达虽可反映不稳定增强,但本文仅基于单次过程与少量站点,缺乏统计检验与统一阈值。后续需依托多个典型个例,系统评估各类指标的稳定性与提前量,构建适用于海岛强对流的综合临近预警指标体系。

致 谢

本工作得到了浙江省气象局的浙江省垂直遥感综合观测平台的支持和帮助。谨致谢忱!

基金项目

浙江省自然科学基金联合基金资助项目(项目号: LZJMY25D050009)、浙江省自然科学基金项目(项目号: LQN26D050005)、舟山市公益性科技项目(项目号: 2026C31045)。

参考文献

- [1] 茆佳佳, 季承荔, 陶法, 等. 地基遥感垂直观测业务技术及应用综述[J]. 气象科技进展, 2025, 15(2): 28-34.
- [2] 王卫民, 徐八林, 雷勇, 等. Ka 波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象, 2024, 50(3): 291-302.
- [3] Tridon, F., Battaglia, A. and Kneifel, S. (2020) Estimating Total Attenuation Using Rayleigh Targets at Cloud Top: Applications in Multilayer and Mixed-Phase Clouds Observed by Ground-Based Multifrequency Radars. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 5065-5085. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5065-2020>
- [4] Radenz, M., Bühl, J., Lehmann, V., Görsdorf, U. and Leinweber, R. (2018) Combining Cloud Radar and Radar Wind Profiler for a Value Added Estimate of Vertical Air Motion and Particle Terminal Velocity within Clouds. *Atmospheric Measurement Techniques*, **11**, 5925-5940. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5925-2018>
- [5] 励臣儒, 杨豪, 李从初, 等. 宁波风廓线雷达数据获取率和降雨预报应用分析[J]. 浙江气象, 2023, 44(2): 41-46.
- [6] 钟倩媚, 陈银兰, 刘炳锋, 等. 粤东一次强降水过程风廓线雷达观测的风场特征[J]. 广东气象, 2026, 48(4): 8-13.
- [7] 何灵芬, 冯上夫, 张晶晶. 微波辐射计探测资料在一天两次短时强降水天气过程中的应用分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(5): 105-109, 113.
- [8] 沈易安, 吴彬, 常秉松, 等. 湖州地区风廓线雷达和微波辐射计的数据质量评估[J]. 浙江气象, 2025, 46(3): 15-19.
- [9] Foth, A., Lochmann, M., Saavedra Garfias, P. and Kalesse-Los, H. (2024) Determination of Low-Level Temperature Profiles from Microwave Radiometer Observations during Rain. *Atmospheric Measurement Techniques*, **17**, 7169-7181. <https://doi.org/10.5194/amt-17-7169-2024>
- [10] 李鸾, 刘蕾, 杨琼琼. 基于微波辐射计的芜湖夏季暴雨特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41(4): 14-16, 21.
- [11] 梅婵娟, 王秀明, 刘晓玲, 等. 国内外海上雷暴研究进展[J]. 气象, 2025, 51(1): 1-16.
- [12] Ding, J., Zhang, W., Zheng, D., Zhang, Y. and Yao, W. (2025) *Journal of Meteorological Research*, **39**, 415-430. <https://doi.org/10.1007/s13351-025-4091-8>