



一次深秋高架雷暴天气的对流特征与发展机制分析

彭霞云 罗玲 李文娟 俞佩 滕代高 冯晓伟 朱开玮

Analysis of convective characteristics and development mechanisms of a late-autumn elevated thunderstorm

PENG Xiayun, LUO Ling, LI Wenjuan, YU Pei, TENG Daigao, FENG Xiaowei, ZHU Kaiwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-035>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析

Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling region

暴雨灾害. 2024, 43(3): 332-341 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-165>

一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达特征

Synoptic conditions and radar characteristics for elevated thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province

暴雨灾害. 2023, 42(5): 541-553 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-219>

2022年广西雷暴活动特征分析

Statistic analysis of thunderstorm characteristics in Guangxi in 2022

暴雨灾害. 2024, 43(6): 702-712 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-117>

冷涡背景下河北雷暴大风环境条件与对流风暴演变个例分析

Analysis of environmental condition and convective storm evolution of a thunderstorm gale event under cold vortex in Hebei

暴雨灾害. 2020, 39(1): 52-62 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.006>

山东省雷暴大风天气学分型与物理诊断量统计特征

Synoptic classification and statistical characteristics of physical diagnoses for thunderstorm gale in Shandong Province

暴雨灾害. 2021, 40(4): 362-373 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.004>

引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析

Analysis of supercell and meso-scale convective system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June 2020

暴雨灾害. 2023, 42(3): 312-323 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-093>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

彭霞云,罗玲,李文娟,等.2025.一次深秋高架雷暴天气的对流特征与发展机制分析[J].暴雨灾害,44(2):197-206. PENG Xiayun, LUO Ling, LI Wenjuan, et al. 2025. Analysis of convective characteristics and development mechanisms of a late-autumn elevated thunderstorm [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(2):197-206 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-035

一次深秋高架雷暴天气的对流特征与发展机制分析

彭霞云^{1,2}, 罗玲¹, 李文娟¹, 俞佩^{1,2}, 滕代高¹, 冯晓伟¹, 朱开玮³

(1. 浙江省气象台, 杭州 310051; 2. 华东区域相控阵天气雷达应用联合实验室, 上海 200030;

3. 浙江省丽水市气象局, 丽水 323000)

摘要: 利用 ERA5 再分析资料、闪电定位仪、双偏振雷达以及微波辐射计等资料, 对 2022 年 11 月 28 日浙北地区一次深秋高架雷暴的环境背景、动力条件、不稳定机制及雷达特征进行了分析。结果表明: (1) 这是一次发生在暖锋前部的高架对流, 500 hPa 高空槽和低空西南急流是主要的影响系统。高空短波槽前涡度平流随高度增加引起强烈的上升运动, 低空急流前部深厚的辐合、强垂直风切变等为对流发展提供了有利的动力条件。(2) 中层干空气和较强的下沉对流有效位能 (DCAPE) 有利于形成强下沉气流。条件不稳定和条件对称不稳定共同作用为对流发展提供了充足的能量条件, 其中条件不稳定起主要作用。(3) 双偏振雷达分析显示, 强盛阶段 50 dBz 强回波可以达到 -20 °C 层, 零度层以上存在差分反射率因子 (Z_{DR}) 柱和差分传播相移率 (K_{DP}) 柱; 强上升气流以及大量冰相粒子的存在, 有利于出现密集雷电。(4) 随着反射率因子核心的快速下降, 风暴后侧入流急流经由风暴强反射率因子核心下方下降到近地面, 表明对流产生的强下沉气流能够冲破逆温层并带动中层高动量空气到达地面, 形成地面大风。对流发生前后地面温度变化很小, 表明低层负浮力作用较小; 水凝物分类结果显示低层存在大量冰雹粒子; 等效水凝物负载估算结果表明冰雹等降水粒子的拖曳对下沉气流有较强的增强作用。

关键词: 高架雷暴; 双偏振雷达; 不稳定机制; 雷暴大风

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2024-035

Analysis of convective characteristics and development mechanisms of a late-autumn elevated thunderstorm

PENG Xiayun^{1,2}, LUO Ling¹, LI Wenjuan¹, YU Pei^{1,2}, TENG Daigao¹, FENG Xiaowei¹, ZHU Kaiwei³

(1. *Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310051*; 2. *East China Array Weather Radar Application Joint*

Laboratory, Shanghai 200030; 3. *Lishui Meteorological Bureau, Lishui 323000*)

Abstract: Using multiple datasets including ERA5 reanalysis, lightning locators, dual-polarization radars, and microwave radiometers, this study analyzed the environmental background, dynamic conditions, instability mechanisms, and radar characteristics of an elevated late-autumn thunderstorm in the northern Zhejiang region on 28 November 2022. The results are as follow. (1) This was an elevated convective event occurring ahead of a warm front, which was mainly influenced by the 500 hPa upper-level trough and low-level southwesterly jet stream. The vorticity advection increasing with height in front of the shortwave trough caused strong upward motion. The strong and deep convergence in the front of the low-level jet stream, and the strong vertical wind shear provided favorable dynamic conditions for the development of convection. (2) Mid-level dry air and strong downdraft convective available potential energy (DCAPE) contributed to the formation of intense downdrafts. The joint action of conditional instability and conditional symmetry instability provided sufficient energy conditions for the development of convection, among which conditional instability played a major role. (3) Dual-polarization radar data analysis showed that, during the peak stage, the 50 dBz strong echoes reached the -20 °C layer, and above the 0 °C layer, Z_{DR} columns and K_{DP} columns existed. The coexistence of strong updrafts and a large number of graupel particles was conducive to the frequent occurrence of lightning. (4) With the rapid descending of the reflectivity core, the rear inflow jet formed and dropped to the surface through the reflectivity core of the storm, indicating that the strong downdraft generated by convection could

收稿日期: 2024-02-29; 定稿日期: 2024-09-15

资助项目: 浙江省科技厅项目 (2022C03150, LZJMD23D050001, LY23D050002); 浙江省气象局科技计划项目 (2023ZD05)

第一作者: 彭霞云, 主要从事强对流天气预报及相关技术方法研究, E-mail: 76608060@qq.com

通信作者: 罗玲, 主要从事天气机理分析研究, E-mail: 76817787@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

penetrate through the inversion layer, transporting high momentum air to the ground and generating intense surface winds. Minor ground temperature changes occurred before and after the convection, indicating that the negative buoyancy effect of the downdraft at low levels was small. The hydrometeor classification results indicate a large presence of hail particles in low levels. The equivalent hydrometeor load estimation showed that the drag effect of large particles, like hail, could have a strong enhancement effect on the downdrafts.

Key words: elevated thunderstorm; dual-polarization radar; instability mechanism; thunderstorm gale

引 言

高架雷暴也称为高架对流,由 Colman (1990a, 1990b) 首次提出,典型的高架雷暴发生在地面暖锋或静止锋前(或冷锋后)的冷气团中,且边界层低层大气是稳定的。由于高架雷暴触发在边界层上,地面为冷区,气温较低,业务中易被忽视,出现漏报。俞小鼎 (2012) 指出,从预报角度来看高架雷暴的预报比地面雷暴的临近预报困难得多。与地基对流一样,高架雷暴可以引发雷电、冰雹、短时强降水等灾害性强对流天气。统计表明在美国高架强对流天气大多数为冰雹,少部分雷暴大风,个别龙卷 (Grant, 1995; Horgan, 2007)。国内的高架雷暴强度相对较弱,研究表明其产生的灾害性天气以冰雹和短时强降水为主 (盛杰等, 2014),有时会产生雷暴大风,但未观测到龙卷 (俞小鼎等, 2012)。

高架雷暴的形成常由 500 hPa 高空槽、低空切变、低空急流和地面冷空气等系统共同作用 (刘晓岳等, 2020), 高空槽前正涡度平流和低层暖湿平流的强迫作用促使 700 hPa 出现较强上升运动 (张一平等, 2014)。另外, 500 hPa 冷平流、850 hPa 暖湿平流、925 hPa 假相当位温高能舌 (张伟等, 2023), “上干下湿”的不稳定层结 (陈军等, 2017) 和强垂直风切变 (曹舒娅等, 2018), 低层辐合高层辐散的抽吸作用 (李典南等, 2019), 槽前次级环流 (李姝霞等, 2023) 等也是触发高架雷暴的有利条件。

高架雷暴也可由多种不稳定机制引起。俞小鼎等 (2016) 分析了三次高架雷暴的不稳定机制分别为条件不稳定和条件对称不稳定,其中条件对称不稳定形成的对流较弱。李博等 (2023) 认为锋生过程引发的上升运动是山东地区一次高架对流的形成原因。刘洋洲等 (2018) 认为条件对称不稳定和弱条件稳定度的锋生强迫引发的较强上升运动是造成华北冷季高架对流的主要不稳定机制。另外,黄小刚等 (2017) 研究指出在绝对地转动量差的调整机制作用下,自低层抬升的气块将产生沿等熵面的惯性加速度从而加强了倾斜运动,也会激发对称不稳定,从而进一步加强倾斜环流。陈淑琴等 (2019) 研究了两次华东地区高架对流过程,发现不稳定机制分别是锋面强迫和绝对地转动量调整导致的对称不稳定。

尽管低层逆温不利于下沉气流保持负浮力到达

地面,但仍有一部分高架雷暴可以产生地面大风,其形成机制引起很多学者关注。目前国外研究认为高架雷暴大风主要有两种形成机制。第一种是对流产生的强下沉气流冲破稳定层结到达地面。浅薄的逆温层和逆温层上较强的不稳定能量使对流相关的上层高动量空气容易达到地面 (Horgan, 2007; Reif and Bluestein, 2017); Bryan 和 Weisman (2006) 通过模拟再现了一次高架飚线过程中冷池首先在稳定层结上形成并向前传播,然后下沉到地面的过程,轨迹追踪显示地面大风只来源于中层。第二种认为高架雷暴大风来自一种“上升-下降”轨迹气流 (“up-down” trajectories) (Schmidt and Cotton, 1989)。即来自近地面的稳定气块由于某些动力抬升机制,如在强垂直扰动气压梯度力 (Bernardet and Cotton, 1998; Macintosh and Parker, 2017) 或重力波 (Schumacher et al., 2023) 的作用下被抬升到上空,气块变得更加稳定,最后由于强负浮力或水凝物负载等原因加速下沉,导致地面强风。Borchardt 等 (2024) 分析了多个和重力波相关的高架事件的雷达特征,发现雷达低仰角径向速度场存在多个辐合-辐散对,并与上部对流的中层急流相分离,认为这些过程的地面大风和上部对流的高动量气流无关。可见不同高架雷暴大风过程的形成机制非常复杂,不同个例有很大差异。

2022 年 11 月 28 日浙江北部出现了一次高架雷暴过程,伴有短时强降水、密集闪电和局地 8~9 级雷暴大风。此次强对流发生在深秋,刷新浙江省出现 8 级以上雷暴大风天气最晚时间记录,具有一定的极端性。由于国内高架雷暴伴随雷暴大风的过程较罕见,其形成机制可能具有一定的特殊性,值得进一步研究。因此,本文利用探空、地面自动站、EAR5 再分析、双偏振雷达、闪电定位仪、微波辐射计等资料对此次高架雷暴的环境背景、动力条件、不稳定机制等天气特征等进行了分析,重点分析和讨论了高架雷暴天气的对流特征和发展机制,为今后此类天气过程的预报提供参考。

1 资料来源和天气实况

1.1 资料来源

本文所用资料包括:(1)浙江省气象信息网络中心提供的 2022 年 11 月 28 日 08:00 (北京时,下同)杭

州站探空资料,用于分析对流发生前的环境条件;(2)浙江省气象信息网络中心提供的2022年11月28日08:00—13:00地面自动站观测数据以及2022年11月28日10:00—12:00杭州下沙(简称“杭州雷达”)和嘉兴S波段双偏振雷达资料(简称“嘉兴雷达”),6 min一次体扫,共9个仰角,包括反射率因子,径向速度,差分反射率因子,差分传播相移率等以及基于双偏振雷达参量反演的水凝物粒子分类产品,用于分析天气实况以及研究对流演变过程和微物理特征;(3)浙江省气象安全技术中心提供的2022年11月28日07:00—13:00全省地面闪电监测数据,用于分析雷电实况和演变;(4)浙江省大气探测中心提供的2022年11月28日08:00—11:00质控后杭州微波辐射计数据,用于分析低层温度层结的演变特征;(5)ECMWF的2022年11月28日00:00—20:00ERA5再分析资料,水平分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率1 h,用于分析此次过程的环流特征、动力条件和不稳定机制。

雷达资料采用arm_pyart模块(Helmus and Collis, 2016)进行质量控制和速度退模糊处理,并插值到格点,水平分辨率1 km,垂直分辨率500 m。由于回波

距离雷达站较远,10:21雷达回波插值后起始高度为2 000 m,其余时次数据起始高度为500 m。水凝物粒子分类数据由新一代天气雷达ROSE软件系统水凝物分类算法反演得到。

1.2 天气实况

从2022年11月28日07:00—13:00地闪数据演变(图1a)可见,07:00—08:00,对流出现在安徽南部和浙江西部,并伴有少量雷电。10:00闪电主要位于杭州西部,数量显著增多,1 h闪电数达640余次。11:00—12:00闪电主要位于杭州东部和绍兴西部,此时闪电密度达到最大,1 h累计达1 000余次,以负地闪为主。12:00—13:00移到绍兴东部、宁波、嘉兴一带,闪电数量有所减少。10:00—13:00,对流从浙江西部移至东部沿海,移速超过 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。从08:00—13:00雨量和阵风分布图(图1b)可见,累计雨量分布不均,出现多条东北-西南走向的狭长雨带,最大累计雨量35 mm,位于杭州临安顺溪村(图1d中蓝色方形),杭州余杭华丰新村站(图1d中蓝色星形)累计雨量也达32.9 mm。虽然累计雨量并不大,但带有显著对流性,10:00—11:00杭州西部、11:00—12:00杭州东部、12:00—13:00绍兴北部都出现了 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$

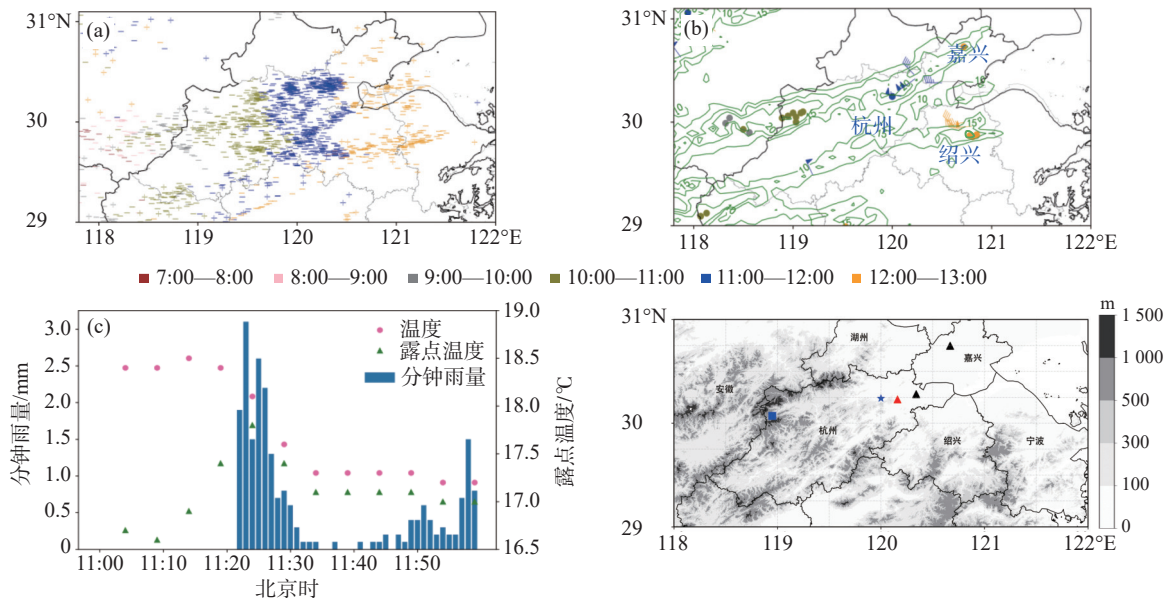


图1 2022年11月28日07:00—13:00时闪电分布(a)、08:00—13:00时累计降水(等值线),瞬时风速超过8级(去除海拔300 m以上高山站)和1 h雨量大于20 mm的站点(圆点)(b,不同颜色代表大风发生的不同时间)、杭州余杭华丰新村站11:00—11:59分钟雨量以及逐5 min温度和露点温度(c)、地形高度(阴影)和观测站点位置(d,黑色三角形代表雷达,红色三角形代表杭州探空和微波辐射计,蓝色星形代表余杭华丰新村站,蓝色正方形代表临安顺溪村站)

Fig. 1 (a) The lightning from 07:00 BT to 13:00 BT, (b) accumulated precipitation (contour), stations with instantaneous wind speed exceeding Beaufort force 8 (excluding high mountain stations above 300 meters above sea level), and hourly rainfall greater than 20 mm from 08:00 BT to 13:00 BT (different colors represent different times of occurrence), (c) minute precipitation, 5-minute temperature and dew point temperature at Huafeng Xincun Station in Yuehang, Hangzhou City from 11:00 BT to 11:59 BT on 28 November 2022. (d) elevation height (shaded) and observation site locations (the black triangle represents the radar station, the red triangle represents the Hangzhou sounding and microwave radiometer station, the blue star represents the position of Huafeng Xincun Station in Yuhang, and the blue square represents the position of Shunxicun Station in Linan)

的短时强降水。从图 1c 杭州余杭区华丰新村站分钟降水分布可见,最大分钟雨量达 3.1 mm,降水效率非常高。另外 11:00—12:00 在杭州东部局地出现了 5 站 8~9 级雷暴大风,最大 $21.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 12:00—13:00 绍兴北部也出现局地 8~9 级雷暴大风。

从演变过程可见,对流在 10:00 左右突然增强,监测到大量闪电,另外 11:00—13:00 出现了局地雷暴大风。无论数值模式还是预报员,都未能正确预报对流的发展增强过程。有必要针对此次高架背景下对流发展加强的原因,对流活动特征、形成雷暴大风的物理机制等进一步研究。

2 环流背景

从 2022 年 11 月 28 日 08:00 高空形势图(图 2a)上可见,500 hPa 高度场上在江西地区有一浅槽,浙江位于槽前西南偏西气流中。850 hPa 江南南部和华南地区都为强西南气流控制,急流中心位于湖南南部,达到 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,浙江西部风速为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,形成强风速辐合。华南地区 850 hPa 温度超过 $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$,比湿超过

$13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,强盛的西南气流将华南和江南南部的水汽和热量不断向浙江地区输送,浙江北部 850 hPa 温度已达到 $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$,超过同期气候平均值 ($4.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 的 3 倍,处于异常偏暖的状态。

从 11 月 28 日 08:00 地面图(图 2b)可见,冷锋位于山东南部至湖北中部,距离浙江较远;暖锋位于江西中部至湖南北部,对流发生区域(图 2b 中椭圆)位于暖锋前部,距离 150 km 左右。地面为弱偏南风,无明显辐合线,缺乏系统性触发抬升条件。另外,08:00 浙江大部地面温度 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,相对周围偏低。分析浙江及周边地形发现,浙江西部、南部以及福建北部多山脉和丘陵,局部海拔高度超过 1 000 m,地形对低层冷气团形成阻滞,也阻挡了 925 hPa 以下的南方暖湿气流北上,导致对流发生区域地面温度相对偏低。而 925 hPa 以上暖湿气流不受阻挡,暖平流增温效应显著,有利于形成边界层逆温。逆温抑制了低层空气的上升,触发抬升发生在逆温层之上,形成暖锋前部高架对流。

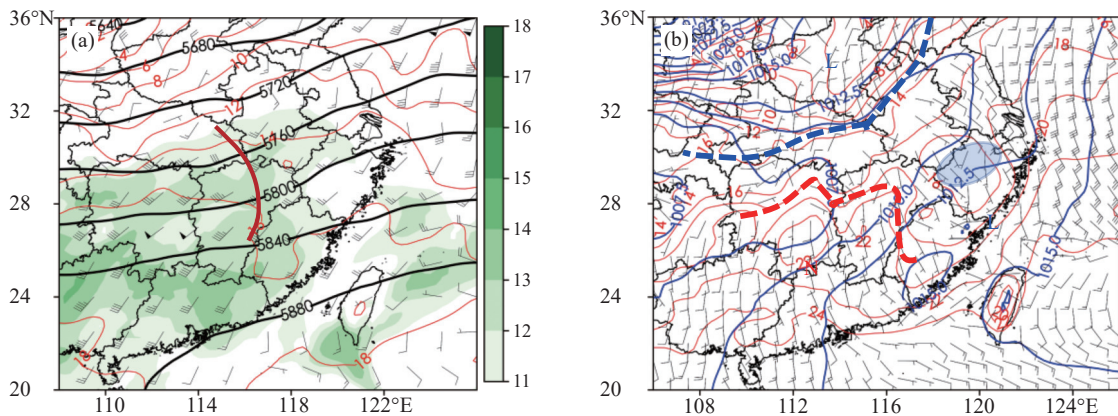


图 2 2022 年 11 月 28 日 08:00 500 hPa 高度场(黑线,单位: gpm)、850 hPa 温度场(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场(风羽)、比湿场(填色,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) (a, 棕色线代表 500 hPa 槽线);海平面气压场(蓝线,单位: gpm)、10 m 风场(风羽)、2 m 温度场(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$) (b, 蓝色粗虚线代表冷锋,红色粗虚线代表暖锋,蓝色椭圆表示对流发生位置)

Fig. 2 The (a) 500 hPa geopotential height (black line), 850 hPa temperature (red line), wind (barb), and specific humidity (colored, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) (The thick brown solid line represent trough), (b) sea level pressure (blue line), 10-meter wind (barb), 2-m temperature (red line) at 08:00 BT on 28 November 2022 (the thick blue dashed line represents a cold front, and the thick red dashed line represents a warm front, the blue oval indicates where convection occurs)

3 对流产生与增强机制

3.1 层结条件

从 2022 年 11 月 28 日 08:00 杭州站探空(图 3a)可见,900 hPa 到地面为稳定层结,以地面为抬升点的对流有效位能(CAPE)为 0,但如果取 850 hPa 为抬升点,计算的 CAPE 值达到 $520 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明存在一定的对流不稳定能量。600 hPa 到地面露点和温度接近,空气湿度大,600—300 hPa 存在干层。上干下湿

的层结,有利于形成条件不稳定。中层干空气夹卷进入对流风暴,也有利于降水粒子蒸发形成负浮力。取 600 hPa 为气块起始下沉高度,计算得下沉对流有效位能(DCAPE)达 $681 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明存在较强的下沉潜势。

从图 2a 可见,28 日 08:00 低层 850 hPa 强西南气流为浙北地区带来暖湿平流,可使 925—850 hPa 温度升高,而低层相对湿度大,云系较多,白天辐射

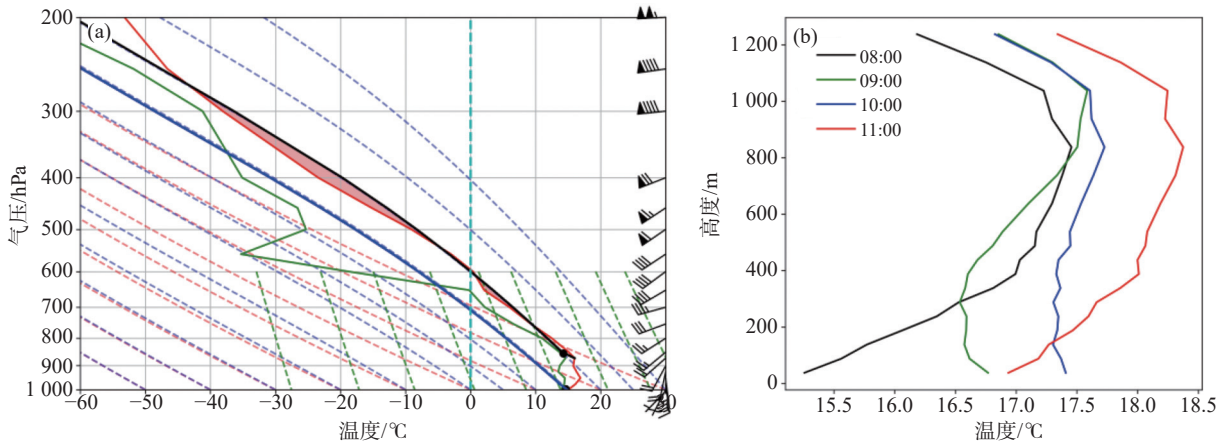


图 3 2022 年 11 月 28 日 08:00 杭州站探空图 (a, 蓝色实线从地面抬升的状态曲线, 黑色实线为从 850 hPa 抬升的状态曲线) 及 08:00—11:00 不同时段杭州站微波辐射计反演的温度廓线 (b)

Fig. 3 (a) Radiosonde map of Hangzhou Station at 08:00 BT (the blue line is the state curve rising from the ground, and the black line is the state curve rising from 850 hPa), and (b) temperature profiles retrieved from Hangzhou microwave radiometer at various times from 08:00 BT to 11:00 BT on 28 November 2022

增温不强, 难以破坏低层的逆温结构。从杭州微波辐射计反演的温度廓线 (图 3b) 可见, 08:00—11:00 时, 地面温度由 15 °C 升至 17 °C 左右, 上层温度也同步上升, 800 m 高度的温度由 17.2 °C 升至 18.3 °C。可见, 即使在对流迅速发展时段 (10:00—11:00), 环境边界层也始终存在逆温, 确认为高架对流。

与俞小鼎等 (2016) 和陈淑琴 (2019) 研究的几个的高架对流相比, 此过程逆温层浅薄, 微波辐射计观测的逆温层厚度约 800 m, 逆温层顶底的温差仅为 1~3 °C 左右。与美国落基山东部 5 次雷暴大风的高架对流过程相比 (Horgan et al., 2007), 本过程具有类似的环境特征: 即逆温层上存在正不稳定能量, 逆温层厚度小于 100 hPa。正不稳定能量使对流发展旺盛, 逆温层厚度小, 有利于下沉气流冲破逆温到达地面。

3.2 动力条件

图 4a 给出 28 日 10:00 500 hPa 高度、涡度和 700 hPa 垂直速度、水平风场, 从中可见, 槽区附近为正涡度区, 配合环境西南偏西风, 为杭州地区带来正涡度平流; 浙江西部位于短波槽前, 700 hPa 存在水平风速辐合, 垂直速度场上对应存在 1~2 Pa·s⁻¹ 的上升运动。沿着对流发展路径作涡度平流垂直剖面 (图 4b), 可见 28 日 11:00 对流发展区域 (119°—120°E, 图中黑色矩形), 低层 800 hPa 以下为负涡度平流, 800—500 hPa 为正涡度平流, 其中 600—500 hPa 正涡度平流达到 1.5×10⁻⁸ s⁻²。根据准地转 ω 方程, 当涡度平流随高度增加就会在这一区域激发出上升运动, 形成有利于对流发展的天气尺度抬升。

高架雷暴的发生发展常伴随着较强的深层垂直

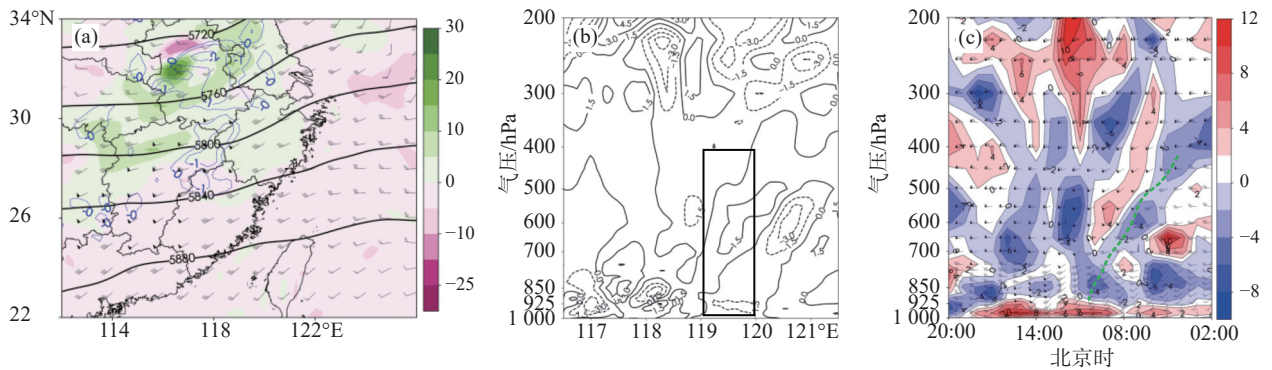


图 4 2022 年 11 月 28 日 10:00 500 hPa 等高线 (黑色等值线, 单位: gpm) 和涡度 (填色, 单位: 10⁻⁵ s⁻¹)、700 hPa 垂直速度 (蓝色等值线, 单位: Pa·s⁻¹) 和水平风场 (a); 沿图 5a 中直线所作 11:00 涡度平流 (单位: 10⁻⁸ s⁻²) 垂直剖面 (b); 02:00—20:00 沿 (120°E, 30°N) 水平风 (风羽, 单位: m·s⁻¹)、散度 (填色, 单位: 10⁻⁵ s⁻¹) 时间-高度剖面 (c, 绿色虚线标出各层风速开始增大的时间)

Fig. 4 (a) The 500 hPa geopotential height contour (unit: gpm) and vorticity (shaded, unit: 10⁻⁵ s⁻¹), 700 hPa vertical velocity (blue line, unit: Pa·s⁻¹) and horizontal wind field at 10:00 BT, (b) vertical profile of vorticity advection (unit: 10⁻⁸ s⁻²) along the straight line in Fig. 5a at 11:00 BT, (c) height-temporal evolution diagram of horizontal wind (arrow, unit: m·s⁻¹) and divergence (shaded, unit: 10⁻⁵ s⁻¹) at grid point (120°E, 30°N) from 02:00 BT to 20:00 BT on 28 November 2022 (the green dashed line marks the time when the wind speed at each level begins to increase)

风切变(刘洲洋等, 2018), 杭州站 08:00 探空计算 0—6 km 垂直风切变为 $22.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 用 ERA5 资料计算的杭州站附近格点 (120°E , 30°N) 0—6 km 垂直风切变从 08:00—12:00 呈不断增强的趋势, 12:00 达到 $27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略)。强垂直风切变有利于对流组织化和形成对称不稳定(刘洲洋等, 2018)。

图 4c 为基于 ERA5 资料的杭州站附近格点 (120°E , 30°N) 水平风场和散度的高度时间演变图, 绿色粗虚线标出各层风速开始增大的时间。可以看到从 02:00 起 400 hPa 风速开始增大, 呈现从上到下传递的特征, 到 09:00 左右, 低层 700 hPa 以下风速也显著增大, 伴随风速增大, 低层散度场出现明显的辐合, 达 $-4\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。11:00—12:00, 450—925 hPa 均为辐合区, 450 hPa 以上为辐散区, 深厚的辐合层, 配合高层辐散, 形成抽吸作用, 促使低层暖湿空气抬升、对流发展。

综上, 高空短波槽前涡度平流随高度增加引起上升运动, 强垂直风切变, 以及低空急流前部伴随的强烈且深厚的辐合, 为对流发展提供了有利的动力条件, 是 10:00—11:00 对流发展加强的原因之一。

3.3 不稳定机制

从图 3a 杭州站探空已知, 气块从 850 hPa 抬升存在正的对流有效位能, 并且有上干下湿的层结, 满足条件不稳定判据。本次对流过程离锋面较远, 不易产生强锋生强迫。但是否存在对称不稳定, 以及两种不稳定机制在对流发展过程中起的作用, 需要进一步分析。

条件对称不稳定的 CSI 判据为

$$\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{\bar{\theta}_e} > \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{M_g} \quad (1)$$

即在垂直于热成风方向(或深层垂直风切变矢量的方向)的横截面内饱和相当位温的坡度大于地转绝对动量的坡度, 说明这一区域很有可能发生条

件对称不稳定。地转绝对动量计算公式为

$$M_g = U_g - fy \quad (2)$$

式中, U_g 是 x 方向地转风分量, f 为地转参数, y 为 y 方向距离原点的距离。

图 5a 为 300—700 hPa 等厚度线, 代表平均热成风方向(章丽娜等, 2018)。在对流发生发展的区域取垂直于热成风方向作一条剖面(图 5a 中直线 AB, A 点为原点), 沿该剖面绘制 28 日 08:00 和 11:00 饱和相当位温、地转绝对动量的垂直剖面(图 5b、c), 由图 5b 可见, 28 日 08:00 对流位于 118° — 119°E 附近, 此位置上空 900—500 hPa 等饱和相当位温随高度变化很小, 没有明显的条件不稳定; 地转绝对动量 M_g 的坡度大于饱和相当位温坡度, 没有条件对称不稳定。11:00, 对流东移至 119.5°E 附近, 从图 5c 可见, 该位置上空 900—650 hPa (图中黑色实线框) 等饱和相当位温随高度显著减小, 等值线较 08:00 更加密集, 表明条件不稳定增强。在条件不稳定区之上, 图 5c 中黑色虚框区域可以看到绝对地转动量斜率小于饱和相当位温的斜率, 表明该区域满足条件对称不稳定。

可见从 08:00 到 11:00, 杭州东部 (119° — 120.5°E) 条件不稳定和条件对称不稳定同时加强, 为对流发展提供充足的能量条件, 有利于对流快速增强。条件(对流)不稳定主要位于 900—650 hPa, 对称不稳定主要位于 550—450 hPa。根据 08:00 杭州探空计算的 CAPE (C_{APE}) 为 $520 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根据垂直速度和 CAPE 经验公式

$$w_{\text{max}} = 0.5 \times \sqrt{2C_{\text{APE}}} \quad (3)$$

估算得到对流系统最大垂直速度达 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而一般由对称不稳定机制导致的上升气流量级为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (俞小鼎等, 2016)。因此条件不稳定在这次过程中起主要作用。

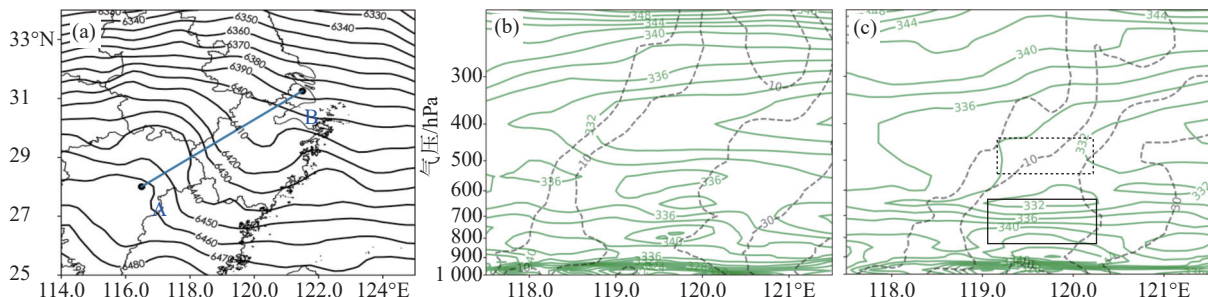


图 5 2022 年 11 月 28 日 08:00 300—700 hPa 厚度差 (a) 以及沿图 a 中直线所作 08:00 (b), 11:00 (c) 饱和相当位温 (绿色实线, 单位: K) 和地转绝对动量 (黑色虚线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 经向-高度剖面图 (黑色虚线矩形表示对称不稳定区, 黑色实线矩形表示条件不稳定区)

Fig. 5 (a) The 300-700 hPa thickness difference at 08:00 BT, meridional-height profile of saturated equivalent potential temperature (green solid line, unit: K) and absolute momentum (black dotted line, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) along the straight line in panel (a) at (b) 08:00 BT, (c) 11:00 BT on 28 November 2022 (black dashed rectangle represents the symmetric unstable region, the black solid rectangle represents the conditionally unstable region)

3.4 雷达特征

3.4.1 雷达回波演变及微物理特征

为了认识对流的演变规律和微物理特征, 利用杭州、嘉兴雷达资料, 按对流发展阶段, 选取 10:21、11:11 和 11:34 这 3 个时次, 分析回波结构、偏振量以及水凝物粒子的演变。图 6 为各时次等高面反射率和雷达参量的垂直剖面, 图 7 为水凝物粒子分类垂直剖面。

从图 6a 可见, 10:21 杭州西部有一些单体对流, 尺度较小, 处于新生阶段。图 6b 中反射率因子中心强度 45~50 dBz, 反射率因子中心随高度向下游倾斜

成悬垂结构。45 dBz 以上强反射率因子可以达到 6 km, 接近 -10 °C 高度, 40 dBz 回波可以达到 7 km, 即 -20 °C 层高度。图 6c 中 Z_{DR} 最大值为 2~3 dB, 大于 1 dB 的 Z_{DR} 柱超过 0 °C 层, 并向上伸展约 1.5 km, 表明低层雨滴被大量输送到 0 °C 层以上, 是存在强上升运动的标志。图 6d 中 K_{DP} 中心值为 1~2 deg·km⁻¹, 0 °C 层以上也存在 K_{DP} 柱。在 5.5 km 以上, Z_{DR} 值迅速降低, 而反射率因子仍较强, 表明对流风暴中上层主要为冰相粒子。水凝物粒子分类 (图 7a) 显示对流中上层以霰为主混合少量冰雹。对流风暴内强上升

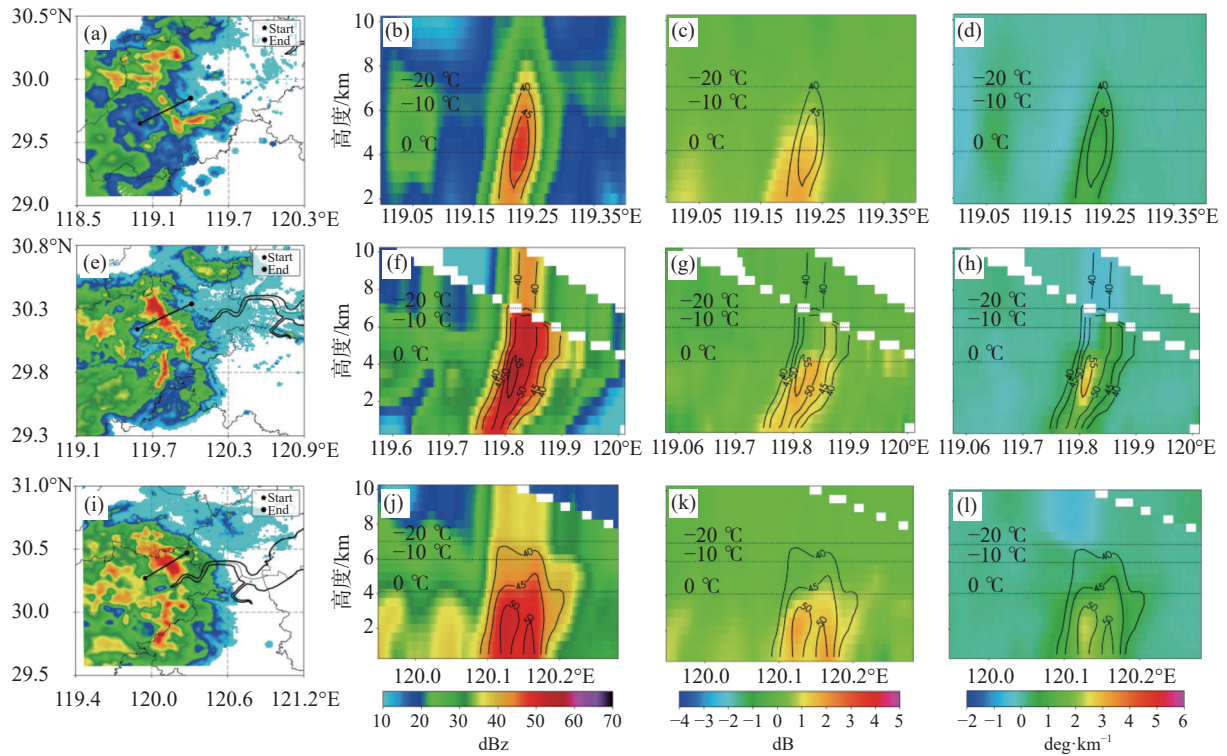


图 6 2022 年 11 月 28 日 10:21 (a—d)、11:11 (e—h) 杭州雷达和 11:34 (i—l) 嘉兴雷达 2.0 km 高度反射率 (a、e、i)、反射率因子垂直剖面 (b、f、j)、 Z_{DR} 剖面 (c、g、k) 和 K_{DP} 剖面 (d、h、l) (剖面位置分别如平面图 a、e、i 中黑色直线所示)

Fig. 6 (a, e, i) Radar reflectivity at 2.0 km altitude, (b, f, j) reflectivity vertical profile, (c, g, k) Z_{DR} vertical profile, and (d, h, l) K_{DP} vertical profile at (a—d) 10:21 BT, (e—h) 11:11 BT from Hangzhou radar, and (i—l) 11:34 BT from Jiaxing radar on 28 November 2022 (the cross-section positions are indicated by the black lines in the plan view panels fig. 6(a, e, i))

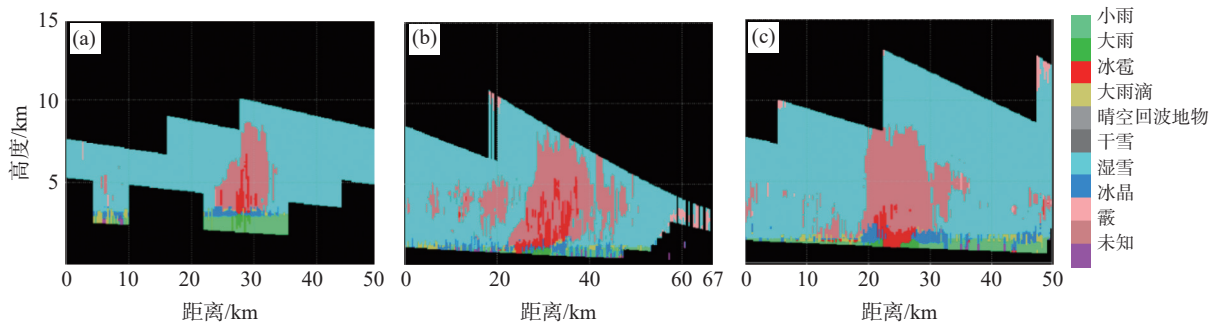


图 7 2022 年 11 月 28 日 10:21 (a)、11:11 (b) 杭州雷达及 11:34 (c) 嘉兴雷达分别沿图 6 (a、e、i) 中黑色直线所得水凝物粒子分类垂直剖面

Fig. 7 Vertical cross-section of hydrometeor classification along the black line in Fig. 6 (a, e, i) from the Hangzhou radar at (a) 10:21 BT, (b) 11:11 BT and the Jiaxing radar at (c) 11:34 BT on 28 November 2022

气流和大量冰相粒子的存在有利于产生雷电 (Deierling et al., 2008), 从图 1a 中可以看到该区域闪电数量开始增多。

11:11 雷达回波融合加强形成准线状回波 (图 6e), 反射率因子中心强度达 55~60 dBz, 位于 3—4 km 高度, 50 dBz 高度达到 7 km, 回波倾斜悬垂的特征更加明显 (图 6f)。不少高架对流 (杜佳等, 2019; 李姝霞等, 2023) 的雷达回波也呈现这样的倾斜特征, 是对流发展强盛的标志。 Z_{DR} 大值区位于 2—4 km 高度, 中心强度和新生阶段接近。在强回波前部存在向上伸展的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱, 表明此处上升气流强盛。 K_{DP} 中心强度达到 2 $\text{deg}\cdot\text{km}^{-1}$ 左右, 比 10:21 增强, 表明空中水凝物含量增多。水凝物分类结果 (图 7b) 显示对流中上层仍以霰为主, 但冰雹范围增大, 表明在强盛的上升气流作用下较多水凝物转化为冰雹, 此时也出现大量闪电活动 (图 1a)。

11:34 回波移到杭州东北部, 伴有密集的闪电, 并在 3 min 后观测到局地雷暴大风。反射率因子垂直剖面图 (图 6j) 中可以看到存在两个强中心, 中心强度都为 50~55 dBz, 强回波质心显著下降, 前侧 (相对于对流的移动方向) 中心接近地面, 后侧中心位于 2 km 左右高度。从 Z_{DR} 剖面 (图 6k) 也可见两个中心, 分别和两个反射率因子中心位置接近。而 K_{DP} 剖面 (图 6l) 中只存在一个和后侧强反射率中心对应的大值区, 中心强度进一步增强到 2.5 $\text{deg}\cdot\text{km}^{-1}$ 左右。表明前侧的反射率因子中心存在较多的大粒子, 后侧反射率因子中心有更多降水物质。虽然回波中心高度和回波强度都明显降低, 但零度层之上大于 40 dBz 回波面积仍较大。水凝物分类 (图 7c) 结果显示大部分冰雹粒子下降到低层, 位于 3 km 以下, 但零度层以上仍存在大量霰粒子, 有利于产生闪电。

3.4.2 速度场特征及雷暴大风形成机制

为了认识高架雷暴大风的形成机制, 利用不同时刻径向速度垂直剖面, 分析风暴内气流的演变及

与回波结构的对应关系, 并通过分析负浮力和水凝物负载的作用解释雷暴大风的形成原因。图 8 为与图 6 中回波演变对应的径向速度垂直剖面, 由于环境风场基本为西南或偏西风, 地面雷暴大风也为偏西风, 剖面方向选取西南东北向 (位置与图 6 相同), 并与雷达射线方向接近, 使剖面上径向速度接近实际速度。

10:21 (图 8a) 对流回波前侧径向速度为 $-15\sim-20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风暴后部径向速度为 $-20\sim-25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在风暴中心 1—5 km 高度形成弱辐合。11:11 (图 8b) 风暴后侧 3—5 km 公里高度形成一条径向速度大值带 (绝对值超过 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 即风暴后侧入流急流, 风暴前侧的径向速度减弱到 $-5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 因此在风暴中心形成强烈的中层径向速度辐合 (MARC), 此时对流垂直发展非常旺盛。后侧入流急流在风暴中心下方略向下伸展, 使风暴中心下方的速度值比周围更大, 图 8b 中风暴中心下方 0.5—1 km 高度径向速度为 $-10\sim-15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 此时地面还未出现 8 级大风。到 11:34 (图 8c) 后侧入流继续向下发展, 在前侧反射率因子中心下方 0.5 km 高度径向速度达到 $-20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 11:37—11:40 地面监测到 8~9 级大风。

从以上分析可知, 随着风暴的发展, 后侧入流急流形成, 而后在风暴中心附近下沉到达近地面, 表明存在前文所述的高架雷暴大风的第二种形成机制, 即下沉气流冲破逆温层, 并将中层高动量空气带到地面。

对流内下沉气流一般主要受负浮力和水凝物负载两种机制的作用 (俞小鼎等, 2020), 近地面逆温层的存在会导致负浮力作用减弱。从图 1c 杭州华丰新村站 5 min 温度演变看, 对流发生前后温度下降仅 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 露点温度存在先上升后轻微下降的情况, 表明地面温度下降的大部分原因可能是降水蒸发, 而下沉气流携带的冷气团 (即负浮力) 的作用很小。从图 6 可见 11:11 和 11:34 反射率因子核心与 K_{DP} 核心位置一致, 并同时下降。反射率因子核心下降被认为是水凝物拖曳作用带动风暴内下沉气流形成的标

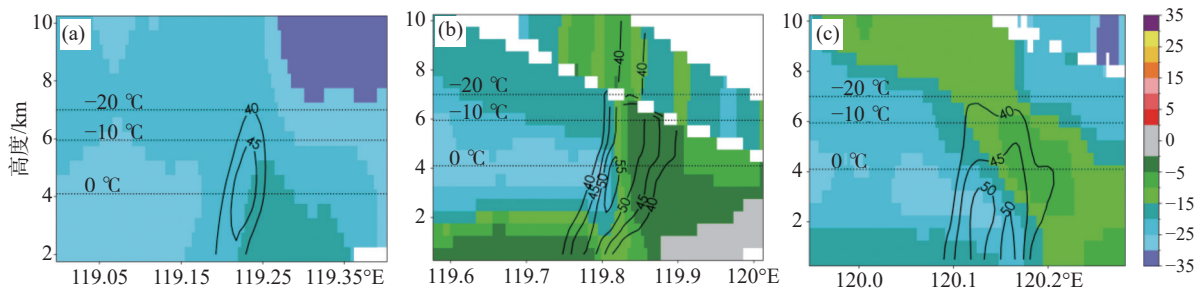


图 8 2022 年 11 月 28 日 10:21 (a)、11:11 (b) 杭州雷达及 11:34 (c) 嘉兴雷达反射率因子 (黑色等值线, 单位: dBz) 以及径向速度 (填色, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 经度-高度剖面图 (剖面位置与图 6 相同)

Fig. 8 Radial reflectivity (contour, unit: dBz) and velocity (shaded, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) longitude-altitude section of Hangzhou radar at (a) 10:21 BT, (b) 11:11 BT, and Jiaxing radar at (c) 11:34 BT on November 28, 2022 (the profile positions are the same as Fig. 6)

志(孙凌峰等, 2003; 王艳春等, 2022)。 K_{DP} 中心位于反射率因子核心区内对下沉气流有较好的指示(唐明晖等, 2023)。从图7c中可见冰雹粒子从中上层快速下降, 积聚在2 km左右高度, 部分融化成大雨, 部分保持固态下降到1 km左右, 表明低层存在强下沉拖曳作用。图6j中可见前侧强回波中心接近地面, 强度达50~55 dBz, 将反射率因子换算成与水凝物负载等效的下沉气流和环境温差(负浮力)(喻小鼎等, 2020), 得到对应的温差可达 $-0.55\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 可见对下沉气流有明显的增强作用。表明大粒子水凝物的拖曳可能对下沉气流到达地面形成地面大风有重要作用。

图8b中对流前部近地面径向速度减小至接近0, 相对于快速东移的风暴来说, 将产生强烈的低层相对风暴入流气流。该入流高度位于500—1 000 m左右, 极有可能有稳定气块进入风暴。这个入流是否会形成“up-down”轨迹下沉气流, 进而增强地面大风, 有待采用高分辨率数值模拟和轨迹分析等技术方法进一步深入研究。

4 结论与讨论

本文利用ERA5再分析资料、地面闪电定位仪、双偏振雷达以及微波辐射计等观测资料, 对2022年11月28日浙北地区一次高架雷暴过程的环境背景、动力条件、不稳定机制, 和雷达特征等进行了分析, 得出以下结论:

(1) 500 hPa高空槽和低层强西南急流是导致此次暖锋前高架雷暴的主要影响系统。高空短波槽前涡度平流随高度增加引起上升运动, 强垂直风切变以及低空急流前部伴随的强烈且深厚的辐合, 为对流发展提供了有利的动力条件。

(2) 环境条件分析表明逆温层上存在正不稳定能量, 有利于对流发展; 中层干空气和较强的DCAPE有利于形成强下沉气流; 浅薄的逆温层使下沉气流更容易到达地面。

(3) 条件不稳定和条件对称不稳定共同作用为对流发展提供了充足的能量, 其中条件不稳定起主要作用。

(4) 双偏振雷达数据分析显示, 对流发展高度较高, 最强盛阶段回波50 dBz强回波可以达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以上存在 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱, 表明上升气流强盛。水凝物分类数据显示对流中上层存在大量霰粒子和部分冰雹。强上升气流和大量冰相粒子共存有利于出现密集闪电。

(5) 反射率因子核心快速下降, 表明风暴内产生了强下沉气流。伴随风暴的发展, 后侧入流急流形

成, 经由风暴强反射率因子核心下方下降到近地面, 表明存在高架雷暴大风的第一种形成机制, 即对流产生的强下沉气流冲破逆温层, 带动上层高动量空气达到地面形成地面大风。对流发生前后地面温度变化很小, 表明在低层下沉气流的负浮力作用较小。水凝物分类结果显示低层存在大量冰雹粒子, 等效水凝物负载估算结果表明降水粒子的拖曳对下沉气流有较强的增强作用。

另外, 对流发展强盛的阶段, 近地面存在强烈的相对风暴入流, 也就是说稳定层内的空气也极有可能被带进风暴内, 是否会形成“上升-下降”轨迹, 下沉到地面助力地面大风的形成, 有待下一步采用高分辨率数值模拟和轨迹分析等技术方法进一步研究。

参考文献 (References):

- 曹舒娅, 张静, 施丹平, 等. 2018. 江苏近10 a高架雷暴特征分析[J]. *气象科学*, 38(5):681-691. Cao S Y, Zhang J, Shi D P, et al. 2018. Analysis on the elevated thunderstorms in the past decade in Jiangsu [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 38(5):681-691 (in Chinese) doi:10.3969/2018jms.0027
- 陈军, 李小兰, 喻义军, 等. 2017. 贵州铜仁一次大范围高架雷暴降雹天气过程分析[J]. *干旱气象*, 35(4):649-656. Chen J, Li X L, Yu Y J, et al. 2017. Analysis on a large range elevated thunderstorm hail weather process in Tongren of Guizhou [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 35(4):649-656 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0649
- 陈淑琴, 章丽娜, 曹宗元, 等. 2019. 华东地区冷季两次高架对流个例分析[J]. *气象与环境科学*, 42(4):63-73. Chen S Q, Zhang L N, Cao Z Y, et al. 2019. Analysis on two elevated convection processes in eastern China in cold season [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 42(4):63-73 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.04.010
- 杜佳, 杨成芳, 戴翼, 等. 2019. 北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析[J]. *气象*, 45(10):1363-1374. Du J, Yang C F, Dai Y, et al. 2019. Formation mechanism of an infrequent blizzard in Beijing in April [J]. *Meteorological monthly*, 45(10):1363-1374 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.003
- 黄小刚, 费建芳, 孙吉明, 等. 2017. 2013年冬季长江中下游地区一次高架雷暴过程的成因分析[J]. *气象学报*, 75(3):429-441. Huang X G, Fei J F, Sun J M, et al. 2017. Analysis on the formation mechanism of an elevated thunderstorm over the middle and lower Yangtze Basin in February 2013 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(3):429-441 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.031
- 李博, 王玮, 刘飞, 等. 2023. 山东初冬一次极端降水和大风天气成因分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 17(4):30-37 (in Chinese). Li B, Wang W, Liu F, et al. 2023. Causes of an extremely precipitation and gale in shandong province in early winter [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 17(4):30-37 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.005
- 李典南, 许东蓓, 苟尚, 等. 2019. 甘肃中部一次冷锋后高架雷暴天气过程综合诊断[J]. *干旱气象*, 37(5):809-816. Li D N, Xu D B, Gou S, et al. 2019. Comprehensive analysis of an elevated thunderstorm process behind cold front in the central of Gansu Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 37(5):809-816 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-05-0809

- 李姝霞,袁小超,王国安,等.2023.一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达成特征[J].*暴雨灾害*,42(5):541-553. Li S X, Yuan X C, Wang G A, et al. 2023. Synoptic conditions and radar characteristics for elevated thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(5):541-553 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-109
- 刘晓岳,于海鹏,盛夏,等.2020.半干旱区一次罕见“雷打雷”天气形成机制分析[J].*气象*,46(12):1596-1607. Liu X Y, Yu H P, Sheng X, et al. 2020. Mechanism analysis of a rare “thunder snow” process in semi-arid area [J]. *Meteorological monthly*,46(12):1596-1607 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.007
- 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等.2018.中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J].*气象*,44(2):258-267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al. 2018. Climatology of cold season elevated convection in northern China [J]. *Meteorological Monthly*,44(2):258-267 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.005
- 盛杰,毛冬艳,沈新勇,等.2014.我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J].*气象*,40(9):1058-1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al. 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during spring [J]. *Meteorological monthly*,40(9):1058-1065 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.003
- 孙凌峰,郭学良,孙立潭,等.2003.武汉“6·22”空难下击暴流的三维数值模拟研究[J].*大气科学*,27(6):1077-1092. Sun L F, Guo X L, Sun L T, et al. 2003. A numerical study of the airplane disaster producing microburst on 22 June 2000 in Wuhan [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*,27(6):1077-1092 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.11
- 唐明晖,陈龙,陈鹤,等.2023.基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析[J].*暴雨灾害*,42(6):692-703. Tang M H, Chen L, Chen H, et al. 2023. Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(6):692-703 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-170
- 王艳春,尉英华,张楠,等.2022.2017年夏季天津一次下击暴流事件的成因初探[J].*暴雨灾害*,41(5):556-563. Wang Y C, Wei Y H, Zhang N, et al. 2022. Preliminary study on the causes of a downburst event in Tianjin in the summer of 2017 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(5):556-563 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021-112
- 俞小鼎,周小刚,王秀明.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].*气象学报*,70(3):331-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,70(3):311-337 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2012.030
- 俞小鼎,周小刚,王秀明.2016.中国冷季高架对流个例初步分析[J].*气象学报*,74(6):902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,74(6):902-918 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2016.075
- 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:294-295. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. The nowcasting on thunderstorms and severe convection [M]. Beijing: China Meteorological Press: 294-295 (in Chinese)
- 章丽娜,周小刚,夏扬.2018.关于业务上应用条件对称不稳定相关问题的讨论[J].*气象学报*,76(5):824-832. Zhang L N, Zhou X G, Xia Y. 2018. A discussion on conditional symmetric instability in operational application [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,76(5):824-832 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2018.028
- 张一平,俞小鼎,孙景兰,等.2014.2012年早春河南一次高架雷暴天气成因分析[J].*气象*,40(1):48-58. Zhang Y P, Yu X D, Sun J L, et al. 2014. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in early spring 2012 [J]. *Meteorological monthly*,40(1):48-58 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.006
- 张伟,陈琳,黄惠镛,等.2023.闽西南地区一次高架雷暴中尺度特征分析[J].*热带气象学报*,39(1):55-65. Zhang W, Chen L, Huang H R, et al. 2023. Mesoscale structure analysis of an elevated thunderstorm in southwest Fujian [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,39(1):55-65 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2023.006
- Bernardet L R, Cotton W R. 1998. Multiscale evolution of a derecho producing mesoscale convective system [J]. *Monthly Weather Review*,126(11):2991-3015. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<2991:MEOA DP>2.0.CO;2
- Borchardt B S, Sherburn K D, Schumacher R S. 2024. Radar signatures and surface observations of elevated convection associated with damaging surface winds [J]. *Weather and Forecasting*,39(6):943-963. doi:10.1175/WAF-D-23-0171.1
- Bryan G H, Weisman M L. 2006. Mechanisms for the production of severe surface winds in a simulation of an elevated convective system [C].// 23rd Conf on Severe Local Storms, St. Louis, MO, American Meteorological Society, 7.5.
- Colman B R. 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: a climatology [J]. *Monthly Weather Review*,118(5):1103-1121. doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1103:TAFSIE>2.0.CO;2
- Colman B R. 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II: organization and instability mechanisms [J]. *Monthly Weather Review*,118(5):1123-1144. doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1123:TAFSIE>2.0.CO;2
- Deierling W, Petersen W A, Latham J, et al. 2008. The relationship between lightning activity and ice fluxes in thunderstorms [J]. *Journal of Geophysical Research*,113:D15210. doi:10.1029/2007JD009700
- Grant B N. 1995. Elevated cold sector severe thunder storms: a preliminary study [J]. *National Weather Digest*,19(4):25-31
- Horgan K L, Schultz D M, Hales Jr J E, et al. 2007. A five-year climatology of elevated severe convective storms in the United States east of the Rocky Mountains [J]. *Weather and Forecasting*,22(5):1031-1042. doi:10.1175/WAF1032.1 doi:10.1175/WAF1032.1
- Helmus J J, Collis S M. 2016. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for working with weather radar data in the Python programming language [J]. *Journal of Open Research Software*,4(1):e25. doi:10.5334/jors.119
- Macintosh C W, Parker M D. 2017. The 6 May 2010 elevated supercell during VORTEX2 [J]. *Monthly Weather Review*,145(7):2635-2657. doi:10.1175/MWR-D-16-0329.1
- Reif D W, Bluestein H B. 2017. A 20-year climatology of nocturnal convection initiation over the central and southern Great Plains during the warm season [J]. *Monthly Weather Review*,145(5):1615-1639. doi:10.1175/MWR-D-16-0340.1
- Schmidt J M, Cotton W R. 1989. A high plains squall line associated with severe surface winds [J]. *Journal of Atmospheric Science*,46(3):281-302. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<0281:AHPSLA>2.0.CO;2
- Schumacher R S, Childs S J, Adams-Selin R D. 2023. Intense surface winds from gravity wave breaking in simulations of a destructive microburst [J]. *Monthly Weather Review*,151(3):775-793. doi:10.1175/MWR-D-220103.1