

钱卓蕾,周弘媛,李美琳,等,2025. 浙江一次冬季高架雷暴的环境场和结构分析[J]. 气象,51(6):700-710. Qian Z L, Zhou H Y, Li M L, et al, 2025. Environmental and structural analysis of a winter elevated thunderstorm in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 51(6):700-710(in Chinese).

浙江一次冬季高架雷暴的环境场和结构分析*

钱卓蕾¹ 周弘媛² 李美琳³ 罗玲⁴

1 浙江省绍兴市气象台,绍兴 312000

2 浙江省绍兴市柯桥区气象局,柯桥 312030

3 浙江省绍兴市气象防灾减灾中心,绍兴 312000

4 浙江省气象台,杭州 310002

提 要: 利用 ERA5 再分析资料、地面自动气象观测站、闪电定位仪以及 S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵雷达资料,对 2024 年 2 月 21 日浙江引发局地冰雹的高架雷暴的环境条件和强风暴结构进行分析。结果表明:雷暴在高空南支槽前和地面冷锋后部发展起来,层结的配置从下到上为“冷湿—暖湿—冷干”,低层为中性-稳定层结,属于典型的高架雷暴。雷暴发生期间,中层存在对流不稳定和对称不稳定,暖湿气流沿着冷空气垫爬升,在逆温层顶之上迅速发展出深厚强烈的垂直对流,上升气流中心位于锋后对流层中层。风暴在冷空气一侧移动,移动方向前侧为不稳定区域,导致其持续发展,质心高度升高,上升气流加强,0℃层之上云闪频次显著增多,对应固态水凝物粒子增多,有利于冰雹形成,云闪密集区与冰雹落区表现为较好的一致性。X 波段相控阵雷达显示降雹单体水平反射率因子核心最初位于 0℃层之上,核心附近的固态水凝物粒子下落时先经过暖湿层部分融化,后经过冷垫迅速降温而部分凝固,降至地面表现为雨夹雹。

关键词: 高架雷暴,对流不稳定,对称不稳定,云闪,相控阵雷达

中图分类号: P458, P446

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.010203

Environmental and Structural Analysis of a Winter Elevated Thunderstorm in Zhejiang Province

QIAN Zhuolei¹ ZHOU Hongyuan² LI Meilin³ LUO Ling⁴

1 Shaoxing Meteorological Office of Zhejiang Province, Shaoxing 312000

2 Keqiao Meteorological Station of Shaoxing, Zhejiang Province, Keqiao 312030

3 Shaoxing Meteorological Disaster Prevention and Mitigation Center of Zhejiang Province, Shaoxing 312000

4 Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310002

Abstract: By using ERA5 reanalysis data, and the surface automatic weather station, lightning locator, S-band dual-polarization radar and X-band phased array radar data, we analyze the ambient conditions and severe storm structure of the elevated thunderstorm that triggered localized hail in Zhejiang Province on 21 February 2024. The results show that the thunderstorm developed in front of the high-altitude southern trough and behind the surface cold front. The stratification configuration was “cold and wet—warm and wet—cold and dry” from bottom to top, and the low-level stratification was neutral and stable, so it was a typical elevated thunderstorm. During the process of thunderstorm activity, there were convective instability and symmetric instability in the middle layer, and the warm and wet air climbed along the cold air cushion,

* 浙江省科技厅重大研发公关计划项目(2022C03150)和浙江省气象局重点项目(2021ZD28、2022ZD01)共同资助

2024 年 4 月 28 日收稿; 2025 年 2 月 21 日收修定稿

第一作者:钱卓蕾,主要从事天气预报和气候研究. E-mail:1033404758@qq.com

通讯作者:罗玲,主要从事强对流等中小尺度天气研究. E-mail:76847787@qq.com

rapidly creating deep and strong vertical convection on the top of the inversion layer. The updraft center was in the middle troposphere behind the front. The storm moved on the side of the cold air, and the forward unstable area led to the continuous development of the storm. With the increasing height of the centroid and the strengthening updraft, the intracloud lightning above the 0°C layer occurred much more frequently, causing the increase of solid hydrocondensate particles, which was conducive to the formation of hail. The dense area of intracloud lightning showed a good consistency with the hail falling area. The X-band phased array radar showed that the core of horizontal reflectivity factor of the hail cell was initially located above the 0°C layer. The solid hydrocondensate particles in the core partially melt when passing through the warm and wet layer during their falling down, and then rapidly cooled down when through the cold cushion, partially frozen. In the end, they fell to the surface as rain mixed with hail.

Key words: elevated thunderstorm, convective instability, symmetric instability, intracloud lightning, phased array radar

引 言

雷暴根据其发生高度的不同,可分为地基雷暴和高架雷暴(吴乃庚等,2013)。高架雷暴造成的灾害性天气类型以冰雹、短时强降水为主,通常会伴有较明显的闪电活动,有些还伴随降雪(郭荣芬等,2009;郑丽娜和靳军,2012;苏德斌等,2012;苟阿宁等,2020)。相比于地基雷暴,高架雷暴预报难度更大(俞小鼎等,2012),因此开展高架雷暴的机理研究具有十分重要的意义。美国学者 Colman(1990a; 1990b)最早将发生在低层冷空气之上的暖湿空气对流称为高架雷暴。中国的高架雷暴多发生在冬春交替时节的冷锋后部,且长江中下游地区是这一现象的高发区。高架雷暴常发生在对流稳定的环境中(盛杰等,2014),高空槽、高低空急流耦合、地面冷低压、强垂直风切变、切变线、低层逆温层、中高层的辐散场等都是高架雷暴形成的有利条件(许爱华等,2013;吴乃庚等,2013;张一平等,2014)。高架雷暴发生前地面附近通常为稳定的冷空气,有明显的逆温层,来自地面的气块很难穿越逆温层而获得浮力,而逆温层之上的气块绝热上升获得浮力导致雷暴产生(Grant,1995;俞小鼎等,2016;张伟等,2023)。上述多种系统的合理配置提供了有利的环境条件,但若无合适的不稳定机制,高架雷暴天气仍然难以发生。逆温层以上的不稳定是高架雷暴的主要触发机制,包括条件不稳定导致的垂直对流,条件对称不稳定导致的倾斜对流,或是在条件稳定性和条件对称稳定性都是近乎中性情况下,由锋生过程强迫的较强锋面垂直环流(Markowski and Richardson, 2010;李怀宇等,2013;陈潇潇等,2015;黄小刚等,

2017;郭大梅等,2018;刘晓岳等,2020)。

随着双偏振天气雷达技术的应用,学者们开展了一些基于双偏振参量的高架雷暴风暴结构研究(黄小刚等,2017;张伟等,2023;李姝霞等,2023;李萌萌等,2023),但常规双偏振雷达的时空分辨率不足(刘黎平等,2016),而产生冰雹等强天气的风暴范围往往较小,需要借助更精细的新型雷达。X波段相控阵雷达具有扫描速度快、分辨率高的特点,经质量控制后的X波段相控阵雷达可清晰揭示对流单体的起始、演变过程,能够探测到风暴垂直结构,提升中小尺度天气系统监测能力(于明慧等,2019;张宇等,2021;张曦等,2022;潘佳文等,2022;肖靖宇等,2022;苏永彦和刘黎平,2022;张羽等,2023;董亚宁等,2023)。

以往对高架雷暴的研究,主要集中在触发机制等方面,有关高架雷暴结构的研究相对较少,且由于浙江冬季高架雷暴较为罕见,目前对于此类灾害性天气的关注度不足。针对2024年2月21日发生在浙江中北部的高架雷暴,本文分析了高架雷暴的背景场和触发机制,并借助S波段双偏振雷达以及X波段相控阵雷达产品分析强风暴演变及结构,以期对冬季高架雷暴预报提供参考。

1 资 料

本文所用资料包括:(1)浙江省地面自动气象观测站小时观测资料;(2)绍兴S波段双偏振雷达和X波段相控阵雷达产品;(3)浙江省闪电定位仪资料;(4)ERA5再分析资料(空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为1h)。图1为S波段双偏振雷达、X波段相控阵雷达和闪电定位仪的站点位置分布。

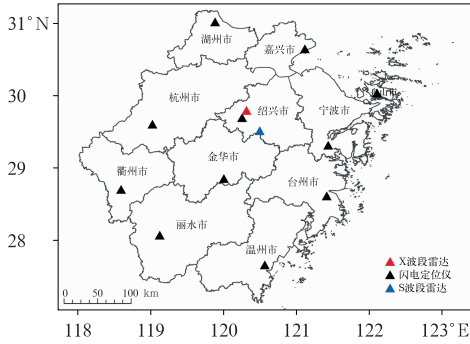


图 1 浙江 S 波段双偏振雷达、X 波段相控阵雷达和闪电定位仪站点分布

Fig. 1 Station distribution of S-band dual-polarization radar, X-band phased array radar and lightning locator in Zhejiang Province

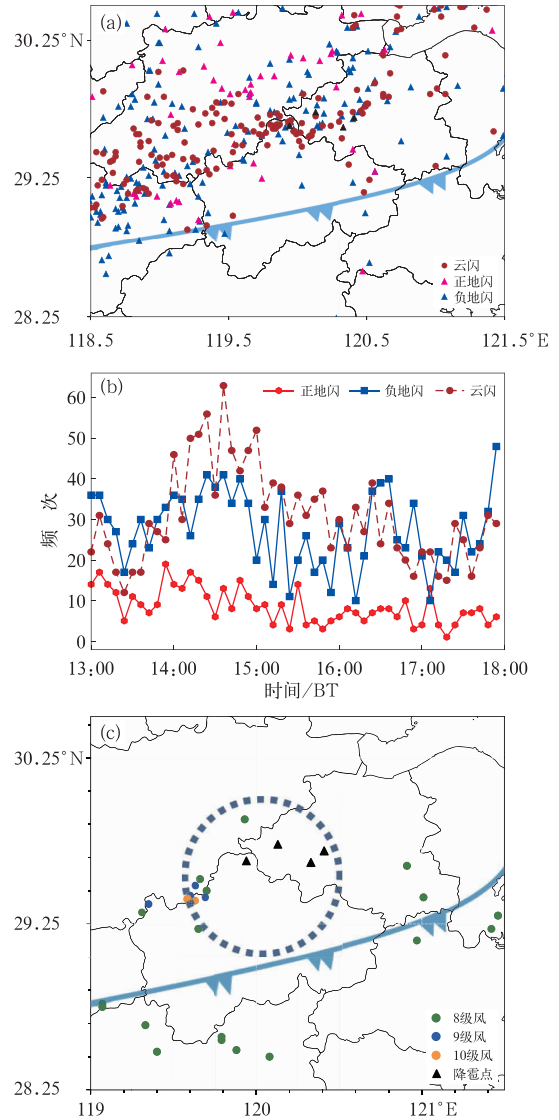
2 天气实况

2024 年 2 月 21 日,浙江中北部出现一次高架雷暴,造成较大范围强雷电、局地雷暴大风和冰雹等灾害性天气(图 2)。其中嘉兴、湖州、杭州、绍兴、金华和宁波等地大部分地区均出现强雷电,多处房屋被雷击中而损坏。从闪电空间分布(图 2a)可见:云闪密集度最高,其中金华浦江—绍兴诸暨—杭州建德一带为云闪密集区,其次为负地闪,正地闪密集度最低。闪电频次演变(图 2b)显示,14:00—15:00(北京时,下同)云闪频次明显跃增,该时段为强风暴强烈发展阶段,云闪在 14:32—14:38 达到峰值,而负地闪频次跃增不明显,正地闪频次较少,因此云闪对高架雷暴的发展阶段有重要指示意义。大风和小冰雹主要出现在 14:00—15:00,有 45 个乡镇(街道)出现 8~10 级大风,金华浦江街道、绍兴诸暨大唐街道、陶朱街道、东和乡和里浦镇等乡镇(街道)出现小冰雹(图 2c),与云闪密集带对应。

3 高架雷暴机制分析

3.1 大尺度背景场

2024 年 2 月 21 日 12:00,500 hPa 位势高度场上(图 3a),40°N 以北高空槽南移,寒潮开始影响南方,30°N 以南南支槽槽线稳定维持在 105°E 附近,槽前有小波动向下游传播,浙江位于南支槽前。700 hPa 上浙江上空西南风风速达 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

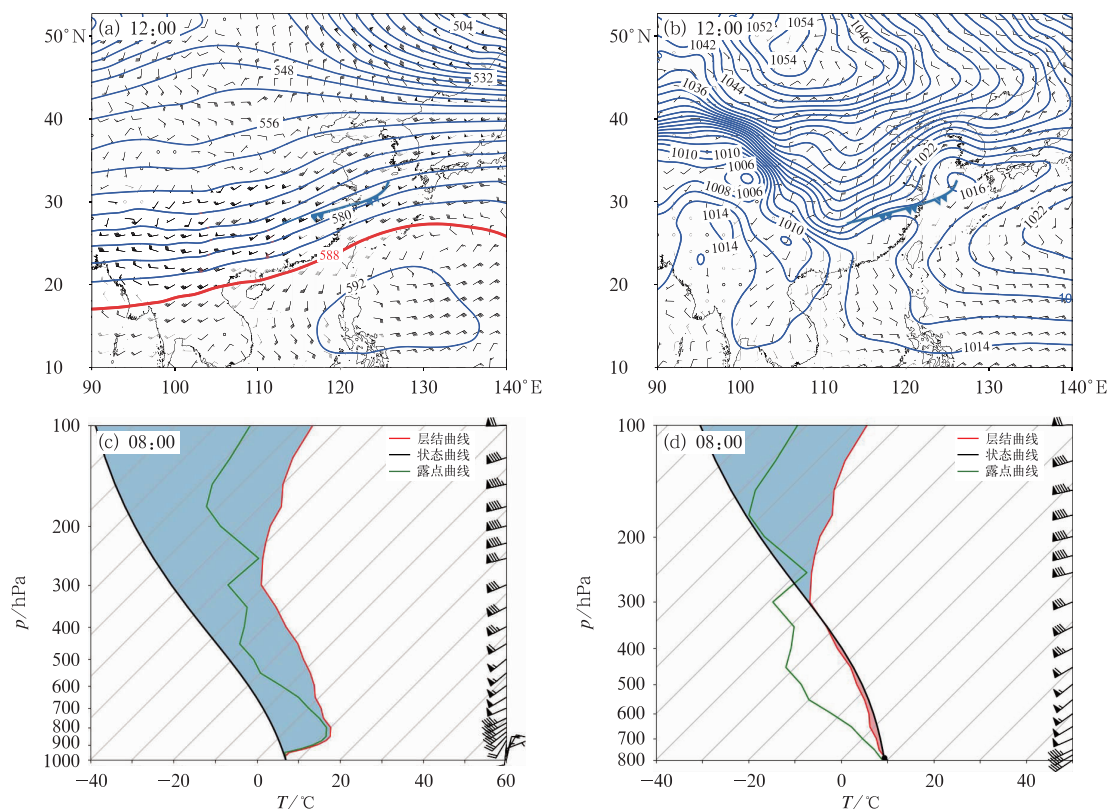


注: 为 14:00—15:00 地面锋线平均位置, 圆圈为 X 波段相控阵雷达可探测范围。

图 2 2024 年 2 月 21 日 13:00—18:00 浙江 (a) 闪电分布, (b) 逐 6 min 闪电频次时间序列, (c) 极大风和降雹站点分布

Fig. 2 (a) Distribution of lightning, (b) time-series of lightning frequency in 6 min, and (c) distribution of stations with extreme wind and hail in Zhejiang Province from 13:00 BT to 18:00 BT 21 February 2024

850 hPa 上达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。地面气压场上冷锋前沿已到达浙江中北部(图 3b),浙江 28.5°N 以北区域近地面为偏北风,雷暴发生在地面锋线以北。从杭州站 08:00 的 1000 hPa 起始探空(图 3c)可知:层结曲线均在状态曲线的右侧,对流有效位能(CAPE)为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,大气接近中性或稳定的层结,



注: 为地面锋线。

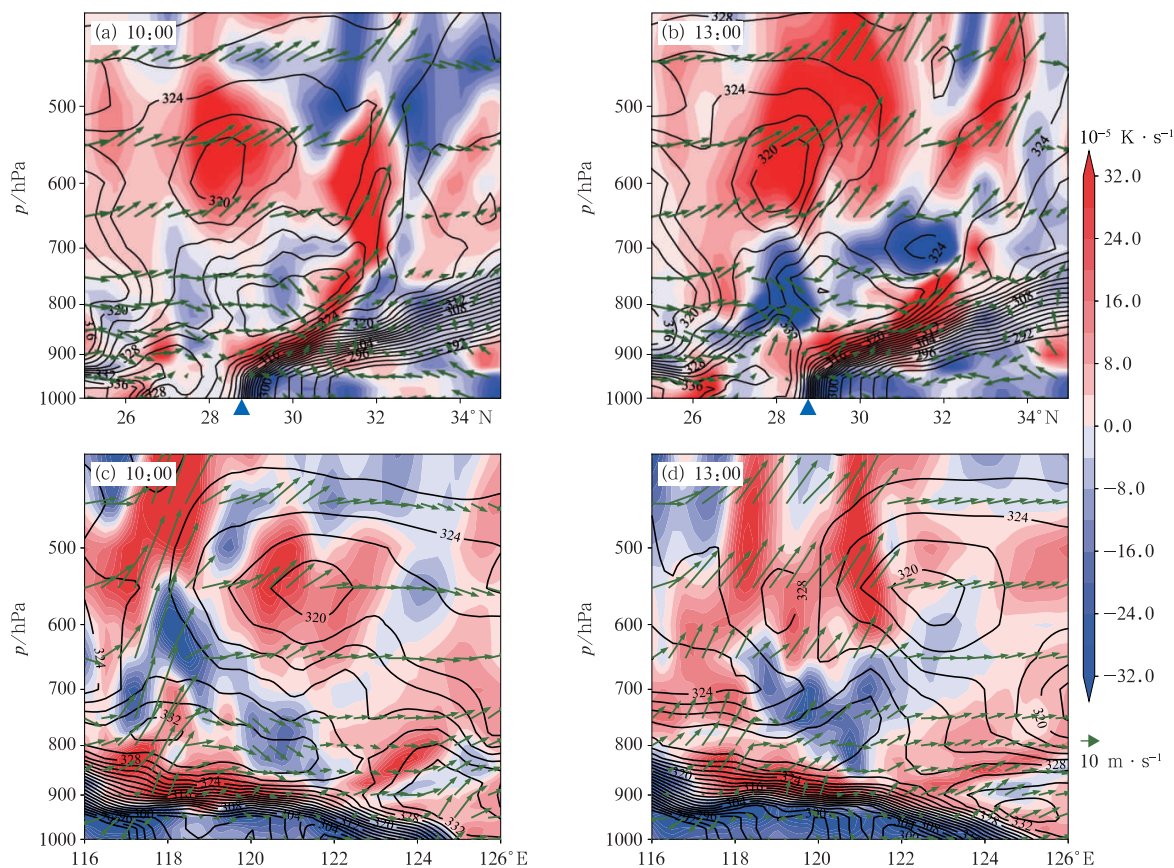
图 3 2024 年 2 月 21 日(a)500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和 700 hPa 风场(风羽), (b)海平面气压场(等值线,单位:hPa)和 10 m 风场(风羽),杭州站(c)1000 hPa、(d)800 hPa 起始高度探空曲线
Fig. 3 (a) The 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 700 hPa wind (barb), (b) sea level pressure (contour, unit: hPa) and 10 m wind (barb), and (c, d) $T-\ln p$ of Hangzhou Station starting from (c) 1000 hPa and (d) 800 hPa on 21 February 2024

不利于地面雷暴发生,而 800 hPa 起始探空(图 3d)显示:800~350 hPa 层结曲线在状态曲线的左侧, $CAPE > 0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 800 hPa 之上存在不稳定,说明高架雷暴与普通雷暴发生的环境场有很大差异。从图 3c 也可以看出,近地面到 850 hPa 有明显的逆温,且 700 hPa 以下层结曲线与露点曲线紧靠,向上逐渐分离,至 500 hPa 附近两条曲线相隔最远,近地面到 500 hPa 层结的配置从下到上为“冷湿—暖湿—冷干”。从风向、风速垂直分布来看,近地面为东北风,850 hPa 以上转为较强的西南风,且西南风随高度增大,0~6 km 垂直风切变超过 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这样的层结有利于出现高架雷暴(张一平等,2014;郭大梅等,2018;王宁等,2023;张伟等,2023)。

3.2 不稳定和触发机制

图 4 为 2024 年 2 月 21 日分别经 29.5°N 、 120°E 的假相当位温(θ_{se})、温度平流和合成环流的垂直剖

面。经向剖面(图 4a,4b)显示,10:00(图 4a), θ_{se} 密集带呈南低北高的倾斜分布, $29^\circ \sim 31^\circ\text{N}$ 范围内 950 hPa 以下为显著的冷平流区,以上为强暖平流区,且暖平流区向北逐渐抬升,到 32°N 附近抬升至 700 hPa,与 θ_{se} 高值中心(330 K)的走向基本一致。以 $-\partial\theta_{se}/\partial p < 0$ 表示条件不稳定,即位势不稳定或对流不稳定(王秀明等,2014),由图 4a 可见, $28^\circ \sim 31^\circ\text{N}$ 的地面锋线上空,800 hPa 以下 θ_{se} 随高度升高而增大,为中性-稳定层结,因此,可以认为锋面下方为对流稳定的斜压大气环境,不利于垂直对流的发展。而 800~550 hPa θ_{se} 随高度升高而减小,即存在条件不稳定层结,有利于自由对流迅速发展,触发高架雷暴(朱乾根等,2007;张伟等,2023)。低层锋面之下以偏北气流为主,锋面附近及上空基本为偏南气流控制,暖湿气流在冷空气垫之上爬升,到达逆温层顶后,中层的位势不稳定能量得以释放,对流触发。13:00(图 4b), θ_{se} 的垂直分布特征基本



注:蓝色三角形为地面锋线位置。

图 4 2024 年 2 月 21 日 θ_{se} (等值线, 单位: K)、温度平流 (填色) 和 (a, b) $v-30w$ (风矢) 沿 120°E , (c, d) $u-30w$ (风矢) 沿 29.5°N 的垂直剖面

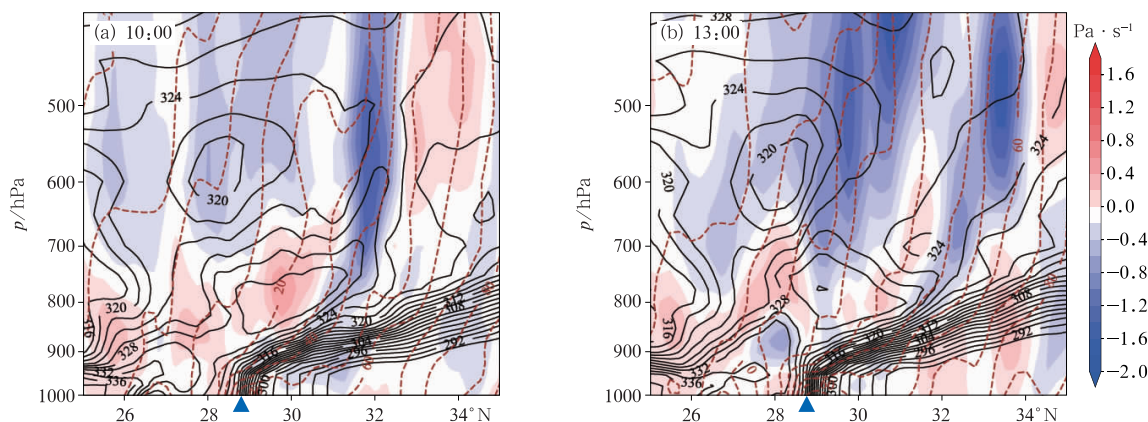
Fig. 4 Cross-section of θ_{se} (contour, unit: K) and temperature advection (colored), overlaid with (a, b) $v-30w$ (wind vector) along 120°E and (c, d) $u-30w$ (wind vector) along 29.5°N on 21 February 2024

不变, 锋面上下的暖冷平流均加强, 暖湿层和冷垫更显著, 偏南气流沿着锋面的爬升运动加强, 更容易到达逆温层顶之上, 激发深厚强烈的垂直对流。

纬向剖面(图 4c, 4d)显示, 10:00(图 4c), 29.5°N 附近近地面已为冷空气覆盖, 逆温层之上垂直上升气流在 118°E 附近最强, 而该地区只在 800~700 hPa θ_{se} 随高度减小, 有浅薄的对流不稳定层结, 向上 θ_{se} 变化不大, 而下游 $119^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 上空 800~550 hPa θ_{se} 随高度明显减小, 为深厚的对流不稳定层结, 容易发展新生对流, 风暴系统移入时将获得强烈发展。13:00(图 4d), 风暴系统中心已移动至 119.5°E , 下游 $120^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 上空 800~550 hPa 仍存在明显的对流不稳定。因此风暴在高层气流引导下向下游移动时强度不断增强。

除存在对流不稳定外, 当大气处于弱的层结稳定状态时, 虽然在垂直方向上不利于上升气流的强

烈发展, 但在一定条件下可以发展斜升气流, 即对称不稳定(朱乾根等, 2007)。当相当位温的坡度大于地转绝对动量的坡度时, 大气存在对称不稳定(俞小鼎等, 2016)。图 5 为 θ_{se} 、地转绝对动量和垂直速度沿 120°E 的垂直剖面, 10:00(图 5a), 可以判断高架雷暴区($29^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$) 800~550 hPa θ_{se} 等值线坡度大于地转绝对动量坡度, 大气存在条件性对称不稳定。该时次锋面附近有弱的上升气流, 锋面之上为下沉气流, 700 hPa 以上为上升气流。13:00(图 5b), 600~500 hPa 和 800~700 hPa θ_{se} 等值线坡度大于地转绝对动量坡度, 条件性对称不稳定仍存在, 此时 $29^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 的锋面上空 800 hPa 以上均为上升气流, 且上升速度较 10:00 明显加强, 上升速度中心位于地面冷锋后部的对流层中层。因此, 锋面之上的对流不稳定和条件性对称不稳定导致逆温层之上迅速触发高架对流(黄小刚等, 2017; 郭大梅等, 2018)。



注:蓝色三角形为地面锋线位置。

图5 2024年2月21日 θ_{se} (实线,单位:K)、地转绝对动量(虚线,单位: $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和垂直速度(填色)沿 120°E 的垂直剖面

Fig. 5 Cross-section of θ_{se} (solid line, unit: K), geostrophic absolute momentum (dashed line, unit: $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and vertical velocity (colored) along 120°E on 21 February 2024

4 强风暴结构

4.1 强风暴演变和闪电分布

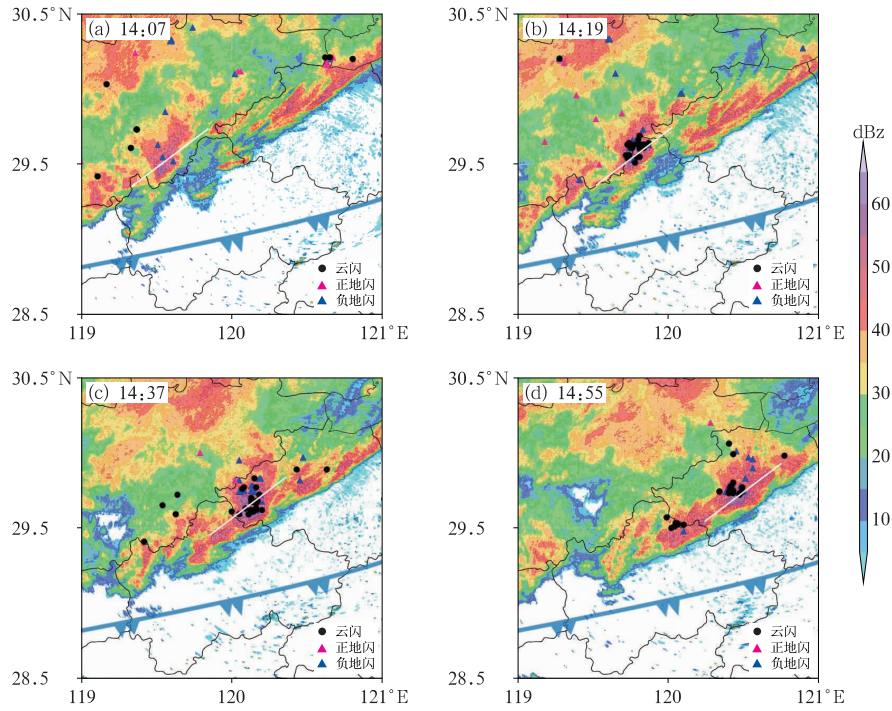
本次高架雷暴过程中造成冰雹和大风天气的强风暴发展阶段为21日14:00—15:00。13:10,风暴最初在浙江西部边界生成,即地面冷锋附近偏后侧,在引导气流作用下向东偏北方向移动,风暴移动方向前侧为不稳定区域(图4b,4d),因此风暴在冷空气一侧有持续发展趋势。14:07移动至杭州建德境内(图6a),风暴已发展为团状结构的中尺度对流系统(MCS),最大组合反射率因子超过60 dBz,此时风暴中主要为云闪和负地闪,分布在风暴中心和后侧,少量正地闪零散分布在后侧层状云区。14:19(图6b), ≥ 55 dBz的反射率因子大值区迅速扩大,云闪频次显著增加,且风暴内云闪占比迅速增大,云闪主要分布在强风暴核附近,正负地闪分布在风暴核心和后侧。14:37(图6c),强风暴进入绍兴诸暨,此时风暴中云闪频次进一步增长,且云闪仍分布在风暴核心附近,正负地闪仍分布在核心和后侧。14:55(图6d),风暴继续向东偏北移动,风暴强度开始减弱,闪电频次减少。

分析强风暴系统中心沿着移动方向(图6中白线)的反射率因子和云闪剖面(图7)可知:14:07(图7a), ≥ 55 dBz的反射率因子大值区向上延伸至

5 km,风暴明显向前倾斜,可能与强垂直风切变有关,也可能因为风暴前侧有单体自中层新生,使得风暴整体表现为前倾结构。该时刻风暴系统内的云闪很少。14:19(图7b), ≥ 55 dBz的强反射率因子扩展至7 km之上,风暴质心高度升高表明上升气流加强,上升气流中心高于600 hPa(约4 km)图略,因此更多粒子被携带至 0°C 层(3.95 km)之上,该高度之上云闪频次显著增多,对应固态水凝物粒子增多(Williams et al,1989),有利于冰雹形成(朱乾根等,2007),冰雹落区基本在云闪密集区内(图2a,2c)。14:37(图7c), ≥ 55 dBz反射率因子大值区继续向上延伸至8 km,表明风暴强度继续加强,云闪持续增多,分布高度在4~13 km,表明 0°C 层之上的固态水凝物粒子更多。14:55(图7d), ≥ 50 dBz反射率因子大值区迅速下沉至6 km及以下,但云闪仍然位于5~10 km。因此强风暴发展过程中云闪基本分布在4 km之上,即 0°C 层之上的强烈上升气流区内。

4.2 X波段相控阵雷达特征分析

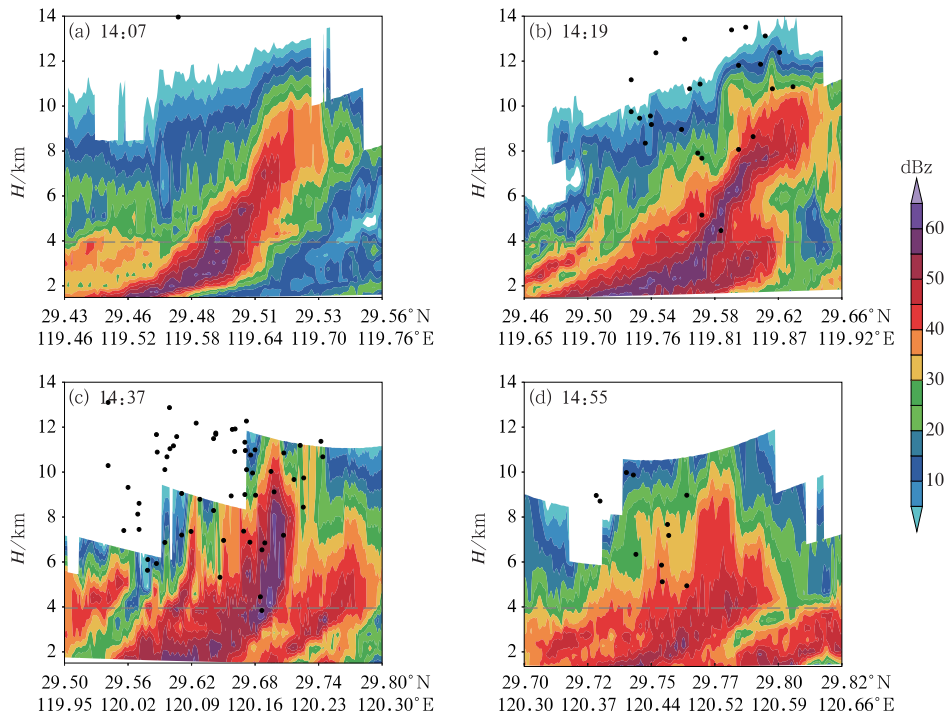
由于S波段雷达无法监测风暴低层到近地面特征,且空间分辨率较低,为研究高架雷暴结构,采用X波段相控阵雷达产品分析降雹单体。图2c圆圈为X波段相控阵雷达可探测范围,降雹区基本在探测范围内。图8为14:39(绍兴诸暨陶朱街道降雹前2 min) 0.75° 和 8.25° 仰角(分别对应降雹点上空



注:白线为图 7 剖面位置, 为 14:00—15:00 地面锋线平均位置。

图 6 2024 年 2 月 21 日绍兴 S 波段雷达组合反射率因子(填色)和 6 min 闪电活动

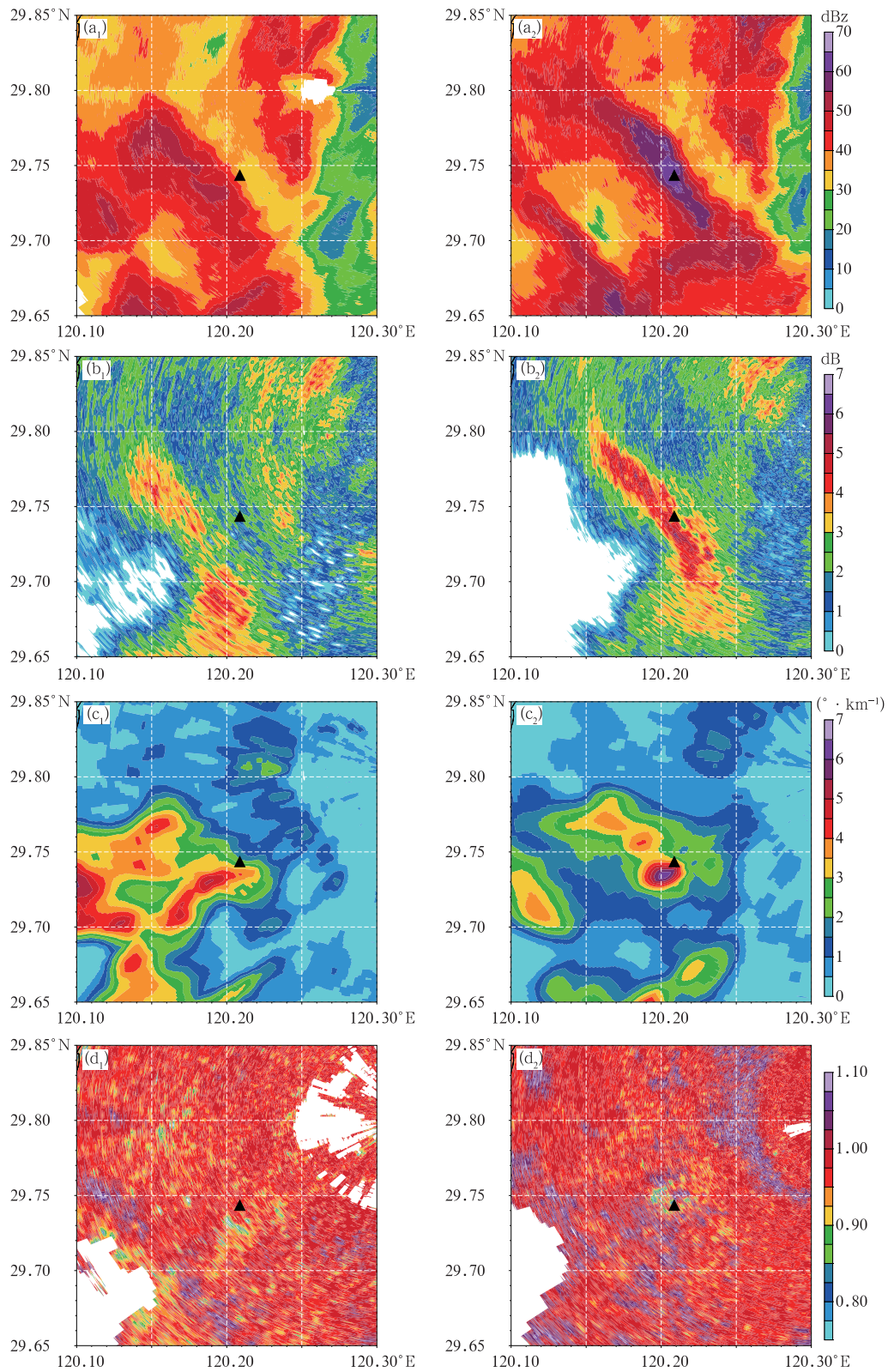
Fig. 6 Composite reflectivity factor (colored) of Shaoxing S-Band Radar and flash distribution in 6 min on 21 February 2024



注:灰色虚线为 0°C 层高度。

图 7 2024 年 2 月 21 日绍兴 S 波段雷达反射率因子(填色)和云闪(圆点)沿图 6 中白线的垂直剖面

Fig. 7 Cross-section of reflectivity factor (colored) of Shaoxing S-Band Radar and intracloud flashes (dot) along the white lines in Fig. 6 respectively on 21 February 2024



注:黑色三角形为降水点位置。

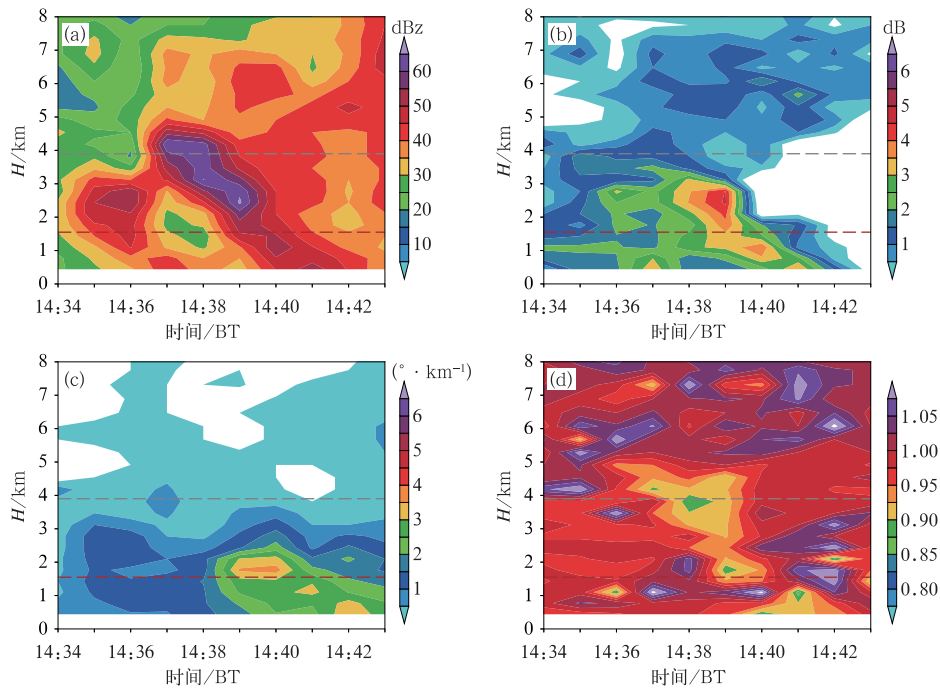
图 8 2024 年 2 月 21 日 14:39 绍兴 X 波段雷达 (a₁~d₁)0.75°、(a₂~d₂)8.25°仰角 (a)Z_H, (b)Z_{DR}, (c)K_{DP}, (d)CC 分布

Fig. 8 Distribution of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) K_{DP} and (d) CC at the (a₁~d₁) 0.75° elevation and (a₂~d₂) 8.25° elevation of Shaoxing X-Band Radar at 14:39 BT 21 February 2024

约 440 m 和 2600 m) 水平反射率因子 (Z_H)、差分反射率因子 (Z_{DR})、差分传播相移率 (K_{DP}) 和相关系数 (CC)。0.75° 仰角上 Z_H 最大约为 50 dBz, 而 8.25° 仰角 Z_H 中心超过 60 dBz, 且偏向于近地面 Z_H 大值区的前方, 即风暴 Z_H 大值区为前倾结构, 且 ≥ 60 dBz 的 Z_H 核心在 2.5 km 之上, 0.75° 仰角上降雹点附近 Z_H 仅在 30 dBz 左右, 而 8.25° 仰角上降雹点在 Z_H 核心区内, 这种 Z_H 分布具有高架雷暴特征。 Z_{DR} 和 K_{DP} 的分布特征与 Z_H 相似, 表现为大值区前倾和核心较高的特征, 0.75° 仰角降雹点附近 $Z_{DR} \geq 1.5$ dB, $K_{DP} \geq 2.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 8.25° 仰角 $Z_{DR} \geq 4.5$ dB, $K_{DP} \geq 2.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。降雹点附近低层到近地面均存在 CC 低值区 ($\text{CC} \leq 0.9$)。

分析该降雹点上空 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 垂直方向上的时间演变特征 (图 9), 已知 0°C 层高度为 3.95 km, 逆温层顶高度为 1.6 km, 逆温层底接近地面。14:37, 降雹点上空 0°C 层高度之上出现了 ≥ 60 dBz 的 Z_H 核心, 该区域范围内 $Z_{DR} \geq 1.0$ dB,

$K_{DP} \geq 0.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, CC 低值中心 ≤ 0.9 , 表明核心附近存在较多固态水凝物粒子。14:38, Z_H 核心自 0°C 层高度之上向下扩展至 3 km, CC ≤ 0.9 范围扩大, 固态水凝物粒子继续增多。随后 ≥ 60 dBz 的 Z_H 核心开始下沉, 14:39 到达 2.5 km 附近, 该高度上 $Z_{DR} \geq 4.5$ dB, $K_{DP} \geq 2.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, $\text{CC} \geq 0.92$, Z_{DR} 和 K_{DP} 迅速增大说明固态水凝物粒子在下落过程中经过暖湿气流层升温导致部分融化, 形成液态和固态混合粒子累积区。当 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 大值区继续下沉至逆温层顶高度附近时, CC 继续增大, 更多固态水凝物粒子融化。低层到近地面存在冷空气垫, 因此当粒子进一步下落时, 出现迅速降温, 部分液态粒子重新凝固为固态粒子。14:41 地面降雹时, Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 大值区也到达近地面, 近地面 $Z_H \geq 50$ dBz, $Z_{DR} \geq 3.0$ dB, $K_{DP} \geq 2.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, $\text{CC} \leq 0.92$, 并出现小范围 $\text{CC} \leq 0.9$, 表明降落至地面的粒子相态为雨夹雹。



注: 灰色虚线为 0°C 层高度, 红色虚线为逆温层顶高度。

图 9 2024 年 2 月 21 日 14:34—14:43 降雹点上空绍兴 X 波段雷达
(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} , (d) CC 的时间-高度演变

Fig. 9 Time-height evolution of (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} and (d) CC of Shaoxing X-Band Radar above the hail site from 14:34 BT to 14:43 BT 21 February 2024

5 结 论

本文基于 ERA5 再分析资料、地面自动气象观测站、闪电定位仪、S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵雷达的观测产品,研究了浙江一次罕见冬季高架雷暴的环境场和风暴结构。主要结论如下:

(1) 雷暴在高空南支槽前和地面冷锋后部发展起来,伴有小冰雹和雷暴大风天气。层结配置从下到上为“冷湿—暖湿—冷干”,低层为中性-稳定层结,近地面到 850 hPa 附近有深厚的逆温层,0~6 km 垂直风切变超过 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,具备高架雷暴发生发展的有利环境条件。

(2) 浙江中北部上空逆温层之上 θ_{se} 随高度减小,同时,中层 θ_{se} 等值线坡度大于地转绝对动量坡度,因此在高架雷暴发生时,对流不稳定和条件性对称不稳定同时存在,即对流-对称不稳定机制,且两种不稳定存在的层次相近。来自低层的暖湿气流在低层冷空气垫上强迫抬升,斜升气流至逆温层之上由于对流不稳定和对称不稳定而快速发展出深厚强烈的垂直对流,上升气流中心在锋后对流层中层。

(3) 风暴在浙江西部生成后,在地面锋线后部冷空气一侧移动,其下游为不稳定区域,移动过程中前沿有新单体生成,合并后风暴不断加强并维持前倾结构。之后风暴发展高度升高,上升气流加强,0℃层之上的云闪频次逐渐增多,对应固态水凝物粒子增多,有利于冰雹形成,云闪密集区与冰雹落区表现为较好的一致性,云闪主要分布在 4 km 之上的强烈上升气流中。利用 X 波段相控阵雷达产品对降雹单体结构的分析表明: Z_{H} 核心最初位于 0℃层高度之上,包含较多固态水凝物粒子,降雹时核心迅速下沉,固态水凝物粒子下落过程中经过暖湿气流层升温部分融化,形成液态和固态混合粒子累积区,继续下落进入冷空气垫时迅速降温部分凝固,降至地面时为雨夹雹。

参考文献

陈潇潇,钱昊钟,周彬,等,2015. 沿江苏南一次伴随“高架雷暴”的暴雪天气成因分析[J]. 大气科学学报,38(6):836-844. Chen X X, Qian H Z, Zhou B, et al, 2015. Cause analysis of a snowstorm case with elevated thunderstorm in southern Jiangsu Province [J]. Trans Atmos Sci, 38(6): 836-844 (in Chinese).

董亚宁,刘福新,孙鸿娉,等,2023. 一次高炮防雹动力效应的相控阵雷达观测分析[J]. 气象,49(8):995-1004. Dong Y N, Liu F X, Sun H P, et al, 2023. A study on dynamic effect of hail suppression by anti-hail gun with phased array radar [J]. Meteor Mon, 49(8): 995-1004 (in Chinese).

苟阿宁,高正旭,侯静,等,2020. 基于雷达和微波辐射计的湖北省冷季“高架雷暴”特征分析[J]. 热带气象学报,36(4):528-541. Gou A N, Gao Z X, Hou J, et al, 2020. Analysis of lightning and precipitation activities in three elevated convective events based on Doppler radar and microwave radiometer in Hubei Province [J]. J Trop Meteor, 36(4): 528-541 (in Chinese).

郭大梅,章丽娜,王秀明,等,2018. 2016年初冬陕西一次高架雷暴天气过程分析[J]. 气象,44(11):1404-1413. Guo D M, Zhang L N, Wang X M, et al, 2018. Analysis on elevated thunderstorm in Shaanxi in early winter of 2016 [J]. Meteor Mon, 44(11): 1404-1413 (in Chinese).

郭荣芬,鲁亚斌,高安生,等,2009. 低纬高原罕见“雷打雪”中尺度特征分析[J]. 气象,35(2):49-56. Guo R F, Lu Y B, Gao A S, et al, 2009. Analysis on mesoscale characteristic of rare thunderstorm snow weather in low latitude plateau [J]. Meteor Mon, 35(2): 49-56 (in Chinese).

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 Meteor Sin, 75(3): 429-441 (in Chinese).

李怀宇,张羽,罗聪,2013. 2012年初春粤北一次少见高架雷暴过程的分析[J]. 广东气象,35(3):1-5. Li H Y, Zhang Y, Luo C, 2013. Analysis of a rare, elevated thunderstorm in northern Guangdong in the early spring of 2012 [J]. Guangdong Meteor, 35(3): 1-5 (in Chinese).

李萌萌,王云,朱冰,等,2023. 一次江淮地区突发降雪的多源观测特征及其成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,17(4):7-15. Li M M, Wang Y, Zhu B, et al, 2023. Multi-source observation characteristics and causes of an abrupt snowfall in Jianghuai Region [J]. Desert Oasis Meteor, 17(4): 7-15 (in Chinese).

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]. Torr Rain Dis, 42(5): 541-553 (in Chinese).

刘黎平,胡志群,吴翀,2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应[用]. 气象科技进展,6(3):28-33. Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar [J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 28-33 (in Chinese).

刘晓岳,于海鹏,盛夏,等,2020. 半干旱区一次罕见“雷打雪”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]. Meteor Mon, 46(12): 1596-1607 (in Chinese).

潘佳文,彭婕,魏鸣,等,2022. 副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析[J]. 气象学报,80(5):748-764. Pan J W, Peng J, Wei M, et al, 2022. Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations [J]. Acta Meteor Sin, 80(5): 748-764 (in Chinese).

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]. Meteor Mon, 40(9):1058-1065(in Chinese).
- 苏德斌, 焦热光, 吕达仁, 2012. 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析[J]. 气象, 38(2):204-209. Su D B, Jiao R G, Lü D R, 2012. Mesoscale observation analysis of a winter snowstorm with thunder and lightning in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 38(2):204-209(in Chinese).
- 苏永彦, 刘黎平, 2022. S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. 气象, 48(2):229-244. Su Y Y, Liu L P, 2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. Meteor Mon, 48(2):229-244(in Chinese).
- 王宁, 杨学斌, 杨成芳, 2023. 2021 年山东一次罕见区域性“雷打雪”天气成因分析[J]. 气象科技, 51(4):562-572. Wang N, Yang X B, Yang C F, 2023. Cause analysis of a rare regional “thunder snow” process in Shandong in 2021[J]. Meteor Sci Technol, 51(4):562-572(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 40(4):389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4):389-399(in Chinese).
- 吴乃庚, 林良勋, 冯业荣, 等, 2013. 2012 年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析[J]. 气象, 39(4):410-417. Wu N G, Lin L X, Feng Y R, et al, 2013. Analysis on the causes of an elevated thunderstorm in early-spring of South China[J]. Meteor Mon, 39(4):410-417(in Chinese).
- 肖靖宇, 杨玲, 俞小鼎, 等, 2022. 佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日短时强降雨天气过程的分析[J]. 气象, 48(7):826-839. Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al, 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. Meteor Mon, 48(7):826-839(in Chinese).
- 许爱华, 陈云辉, 陈涛, 等, 2013. 锋面北侧冷气团中连续降雹环境场特征及成因[J]. 应用气象学报, 24(2):197-206. Xu A H, Chen Y H, Chen T, et al, 2013. Environment characteristics and causes of a continuous hail fall event occurred within the cold air mass to the north of a cold front[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2):197-206(in Chinese).
- 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等, 2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象, 45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3):330-344(in Chinese).
- 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):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 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 Meteor Sin, 74(6):902-918(in Chinese).
- 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. Meso-scale structure analysis of an elevated thunderstorm in southwest Fujian[J]. J Trop Meteor, 39(1):55-65(in Chinese).
- 张曦, 黄兴友, 刘新安, 等, 2022. 北京大兴国际机场相控阵雷达强对流天气监测[J]. 应用气象学报, 33(2):192-204. Zhang X, Huang X Y, Liu X A, et al, 2022. The hazardous convective storm monitoring of phased-array antenna radar at Daxing International Airport of Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2):192-204(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 40(1):48-58(in Chinese).
- 张宇, 白兰强, 孟志勇, 等, 2021. 珠江口龙卷风的快速扫描和偏振相控阵雷达观测(英文)[J]. 热带气象杂志, 27(1):81-86. Zhang Y, Bai L Q, Meng Z Y, et al, 2021. Rapid-scan and polarimetric phased-array radar observations of a tornado in the Pearl River Estuary[J]. J Trop Meteor, 27(1):81-86(in Chinese).
- 张羽, 陈炳洪, 曾琳, 等, 2023. 基于 X 波段双偏振相控阵雷达的超级单体风暴观测分析[J]. 热带气象学报, 39(2):218-229. Zhang Y, Chen B H, Zeng L, et al, 2023. X-band dual-polarization phased-array radar observations of a supercell[J]. J Trop Meteor, 39(2):218-229(in Chinese).
- 郑丽娜, 靳军, 2012. “2. 28” 山东罕见“雷打雪”现象形成机制分析[J]. 高原气象, 31(4):1151-1157. Zheng L N, Jin J, 2012. Analysis on formation mechanism of rare “thundersnow” phenomenon in Shandong on 28 February 2010[J]. Plateau Meteor, 31(4):1151-1157(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理与方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社:393-396. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principle and Method of Synoptic Meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press:393-396(in Chinese).
- Colman B R, 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: a climatology[J]. Mon Wea Rev, 118(5):1103-1122.
- Colman B R, 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II: organization and instability mechanisms[J]. Mon Wea Rev, 118(5):1123-1144.
- Grant B N, 1995. Elevated cold-sector severe thunderstorms: a preliminary study[J]. Natl Wea Dig, 19(4):25-31.
- Markowski P, Richardson Y, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Williams E R, Weber M E, Orville R E, 1989. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds[J]. J Geophys Res: Atmos, 94(D11):13213-13220.

(本文责编:张芳)