

# 一次冬季高架雷暴的环境场和结构分析

钱卓蕾<sup>1</sup> 周弘媛<sup>3</sup> 李美琳<sup>2</sup> 罗玲<sup>4</sup>

1 绍兴市气象台, 浙江 绍兴 312000

2 绍兴市气象防灾减灾中心, 浙江 绍兴 312000

3 绍兴市柯桥区气象局, 浙江 柯桥 312030

4 浙江省气象台, 杭州 310002

**摘要:** 利用 ERA5 再分析资料、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 日浙江一次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, 上升气流中心在锋后对流层中层。风暴在冷空气一侧移动, 移动方向前侧为不稳定区域, 导致风暴持续发展, 质心高度升高, 上升气流加强, 0°C 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°C 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

## Environmental and Structural Analysis of a Winter Elevated Thunderstorm

QIAN Zhuolei<sup>1</sup> ZHOU Hongyuan<sup>3</sup> LI Meilin<sup>2</sup> LUO Lin<sup>4</sup>

1 Shaoxing Meteorological Office, Zhejiang Shaoxing 312000

2 Shaoxing Meteorological Disaster Prevention and Reduction Center, Zhejiang Shaoxing 312000

3 Keqiao Meteorological Station of Shaoxing, Zhejiang Shaoxing 312030

4 Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310002

**Abstract:** By using reanalysis data, automatic weather station, lightning locator, S-band dual-polarization radar and X-band phased array radar data, the environmental conditions and severe storm structure of the elevated thunderstorm triggering local hail in Zhejiang Province on 21 February 2024 were analyzed. 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 - cold and dry - warm and wet" from bottom to top, and the low-level stratification was stable, so it belonged to a typical elevated thunderstorm. During the occurrence of

浙江省科技厅重点项目(2022C03150)和浙江省气象局重点项目(2021ZD28, 2022ZD01)共同资助。

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: 768477872@qq.com

thunderstorm, there were convective instability and symmetrical instability in the middle layer, and the warm and wet air climbed along the cold air cushion and rapidly developed 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 unstable area in front of the moving direction led to the continuous development of the storm, with the height of the center of mass increasing, the updraft strengthening, and the cloud flashover frequency above the 0°C layer increasing significantly, corresponding to the increase of solid hydrocondensate particles, which was conducive to the formation of hail. The cloud flashover dense area showed a good consistency with the hail falling area. The X-band phased array radar shows that the core of horizontal reflectivity factor of the hail cell was initially located above the layer height of 0°C, and solid hydrocondensate particles in the core partially melt through the warm and wet layer when falling, and then rapidly cooled down through the cold cushion and partially solidified, then fell to the ground as rain and hail.

**Key words:** elevated thunderstorm, convective instability, symmetric instability, cloud flash, 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(苟阿宁等,2020;郭荣芬等,2009;郑丽娜和靳军,2012;苏德斌等,2012)。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季节的冷锋后部,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,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

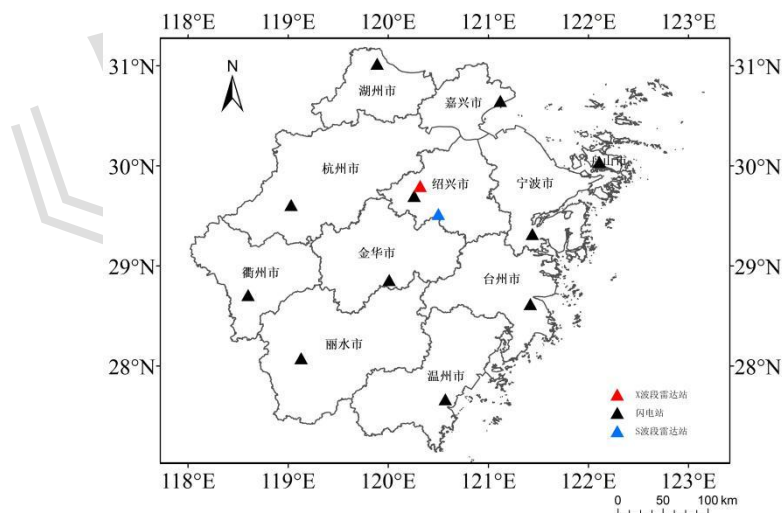
69 雷暴风暴结构研究（黄小刚等，2017；张伟等，2023；李姝霞等，2023；李萌萌  
70 等，2023），但常规双偏振雷达的时空分辨率不足（刘黎平等，2016），而产生  
71 冰雹等强天气的风暴范围往往较小，需要借助更精细的新型雷达。X 波段相控阵  
72 雷达具有扫描速度快、分辨率高的特点，质控后的 X 波段相控阵雷达可清晰揭  
73 示对流单体的起始、演变过程，能够探测到风暴垂直结构，提升中小尺度天气系  
74 统监测能力（于明慧等，2019；张宇等，2021；张曦等，2022；潘佳文等，2022；  
75 肖靖宇等，2022；苏永彦和刘黎平，2022；张羽等，2023；董亚宁等，2023）。

76 以往对高架雷暴的研究，主要集中在触发机制等方面，有关高架雷暴风暴结  
77 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  
78 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  
79 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  
80 阵雷达产品分析强风暴演变及结构，以为冬季高架雷暴预报提供参考。

## 81 1 资料与方法

### 82 1.1 资料来源

83 本文所用资料包括：（1）浙江省自动气象观测站小时观测资料；（2）绍兴 S  
84 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）  
85 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 1 h）。图 1 为 S  
86 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。



87  
88 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

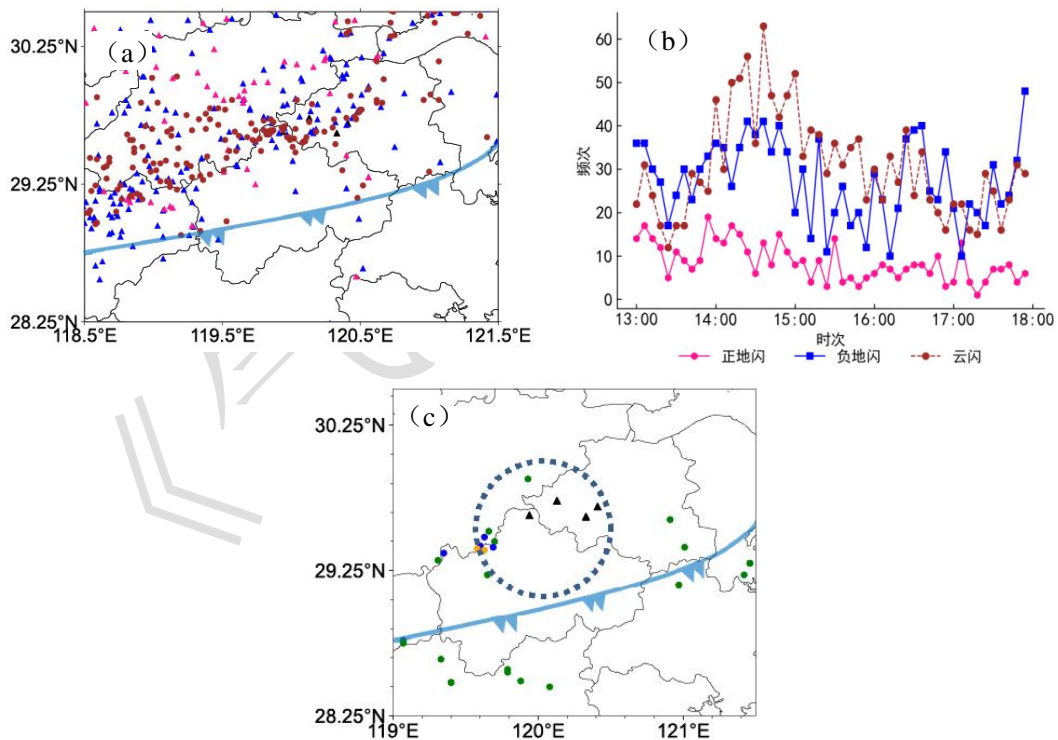
89 Fig. 1 Station distribution of S-band dual polarization radar, X-band phased array radar and  
90 lightning locator in Zhejiang Province

91

## 92 2 天气实况

93 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、  
 94 局地雷暴大风和冰雹等灾害性天气（图2）。其中浙江中北部嘉兴、湖州、杭州、  
 95 绍兴、金华和宁波等地市大部分地区均出现强雷电，多处房屋被雷击中而损坏。  
 96 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  
 97 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  
 98 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  
 99 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  
 100 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  
 101 要发生在14:00—15:00，有45个乡镇（街道）出现8~10级大风，金华浦江街  
 102 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  
 103 （图2c），与云闪密集带对应。

104



105

106

107 图2 2024年2月21日13:00—18:00 (a) 闪电分布，(b) 逐6 min闪电频次时间序列，(c) 极  
 108 大风和降雹站点分布  
 109 Fig. 2 (a) Distribution of lightning (b) time-series of lightning frequency  
 110 in 6 minutes, (c) distribution of extreme wind and hail sites from 13:00 BT to 18:00 BT on 21  
 February 2024

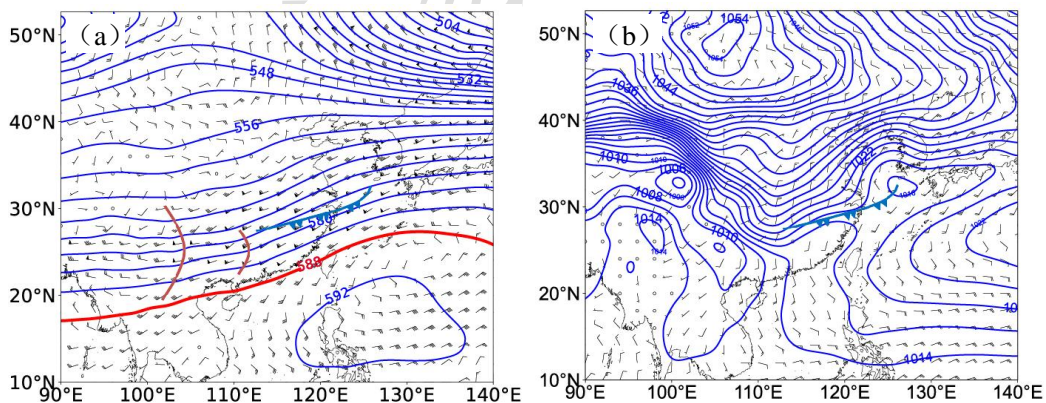
111

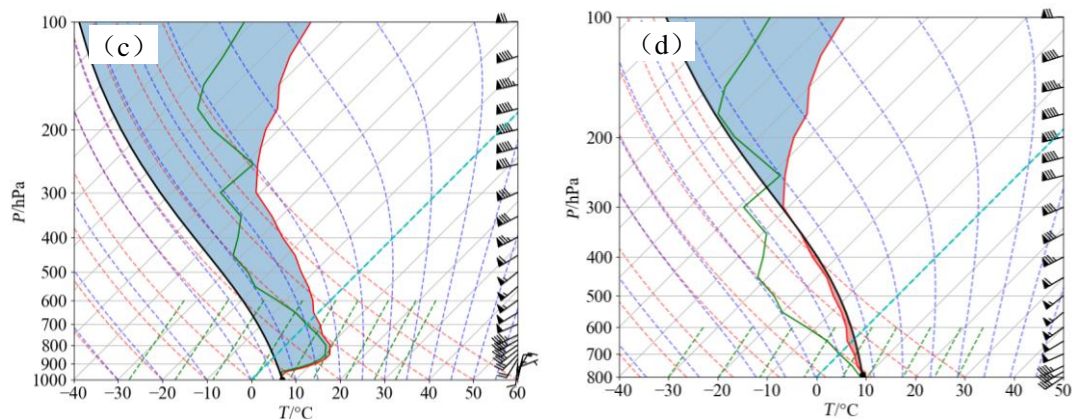
### 112 3 高架雷暴机制分析

#### 113 3.1 大尺度背景场

114 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,  
115 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  
116 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 $24 \text{ m s}^{-1}$ ,  
117 850 hPa上达 $12 \text{ m s}^{-1}$ (图略)。地面气压场上冷锋前沿已到达浙江中北部(图3b),  
118 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  
119 时1000 hPa起始探空(图3c)可知: 层结曲线均在状态曲线的右侧, 对流不稳定  
120 能量(CAPE)为 $0 \text{ J kg}^{-1}$ , 大气接近中性或稳定的层结, 不利于地面雷暴发生,  
121 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,  
122 CAPE $>0 \text{ J kg}^{-1}$ , 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  
123 场有很大差异。近地面到850 hPa有明显的逆温, 且700 hPa以下层结曲线与露点  
124 曲线紧靠, 往上逐渐分离, 到500 hPa附近两条曲线相隔最远, 近地面到500 hPa  
125 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  
126 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  
127 直风切变超过 $24 \text{ m s}^{-1}$ 。这样的层结有利于出现高架雷暴(张一平等, 2014; 郭  
128 大梅等, 2018; 王宁等, 2023; 张伟等, 2023)。

129





130

131 图3 2024年2月21日 (a) 500 hPa位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 和700hPa风场 (风羽)、  
 132 (b) 海平面气压场 (等值线, 单位: hPa) 和10m 风场 (风羽), 杭州站 (c) 1000 hPa、  
 133 (d) 850 hPa 起始高度探空

134 Fig. 3 (a) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 700hPa wind (barb), (b) sea  
 135 level pressure (contour, unit: hPa) and 10m wind (barb) at 12:00 BT,  $T-lnp$  of Hangzhou Station  
 136 from the starting level of (c) 1000 hPa and (d) 850 hPa at 08:00 BT on 21 February 2024

### 137 3.2 不稳定和触发机制

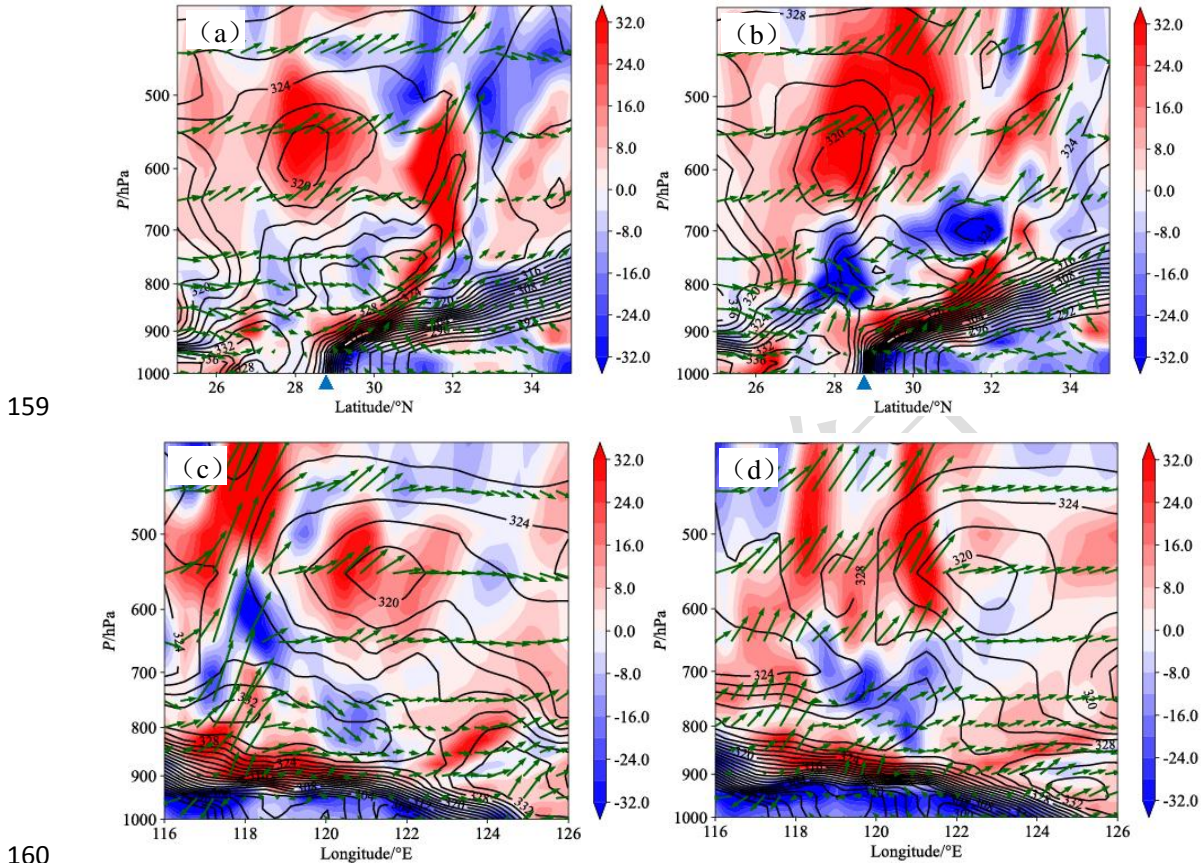
138 图4为2024年2月21日分别经120 °E、29.5 °N的假相当位温 ( $\theta_{se}$ )、温度平流  
 139 和合成环流的垂直剖面。从纬度-高度剖面 (图4a, 4b) 可见: 10:00 (图4a),  $\theta_{se}$   
 140 密集带呈南低北高的倾斜分布, 29°~31°N范围内, 950 hPa以下为显著的冷平  
 141 流区, 以上为强暖平流区, 且暖平流区向北逐渐抬升, 到32°N附近抬升至700 hPa,

142 与 $\theta_{se}$ 高值中心 (330 K) 的走向基本一致。以 $-\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$ 表示条件不稳定, 即位势

143 不稳定或对流不稳定 (王秀明等, 2014)。可以看出在28°~31°N的地面锋线上空,  
 144 800 hPa以下 $\theta_{se}$ 随高度升高而增大, 为中性—稳定层结, 因此, 可以认为锋面下  
 145 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  $\theta_{se}$ 随高  
 146 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  
 147 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  
 148 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,  
 149 中层的位势不稳定能量得以释放, 对流触发。13:00 (图4b),  $\theta_{se}$ 的垂直分布特  
 150 征基本不变, 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  
 151 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。

152 经度-高度剖面 (图4c,4d) 显示, 10:00 (图4c), 29.5°N附近近地面已为冷  
 153 空气覆盖, 逆温层之上垂直上升气流在118°E附近为最强, 而该地区只在800~700

154 hPa  $\theta_{se}$ 随高度减小，有浅薄的对流不稳定层结，向上 $\theta_{se}$ 变化不大，而下游119°~  
 155 122°E上空800~550hPa  $\theta_{se}$ 随高度明显减小，为深厚的对流不稳定层结，容易发  
 156 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  
 157 已移动至119.5°E，下游120°~124°E上空800~550 hPa仍存在明显的对流不稳定  
 158 层结。因此风暴在高层气流引导下向下游移动时强度不断增强。



159

160

161

注：蓝色三角形为地面锋线位置，下同。

162

163

164

165

166

167

168

169

170

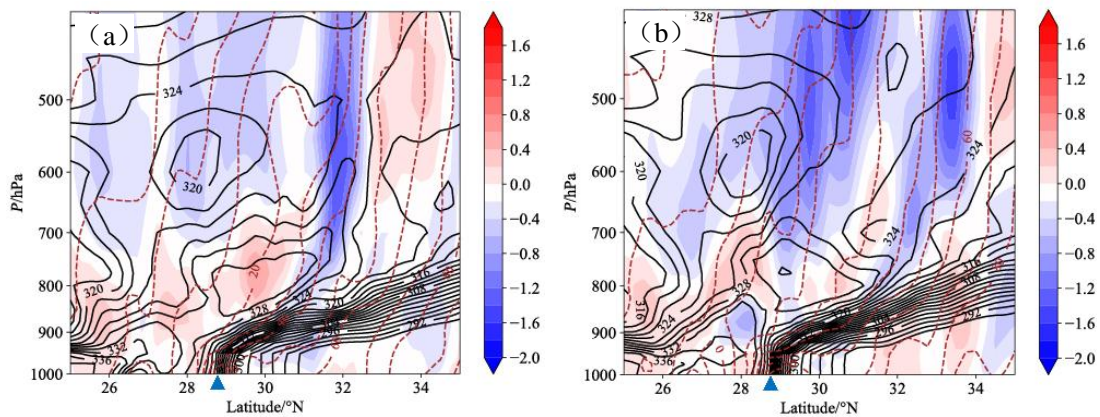
171

172

图4 2024年2月21日沿（a，b）120°E，（c，d）29.5°N的 $\theta_{se}$ （等值线，单位：K）、温度平流（填色，单位： $10^{-5} \text{ K s}^{-1}$ ）和（a，b） $v-30w$ （风矢），（c，d） $u-30w$ （风矢）的垂直剖面  
 Fig. 4 Cross-sections of  $\theta_{se}$  (contour, unit: K), temperature advection (colored, unit:  $10^{-5} \text{ K s}^{-1}$ ), (a, b)  $v-30w$  (vector) and (c, d)  $u-30w$  (vector) along (a, b) 120°E and (c, d) 29.5°N on 21 February 2024

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能有上升气流的强烈发展，但在一定条件下可以发展斜升气流(朱乾根等，2007)。当等位温面的坡度大于等绝对角动量面的坡度时，大气存在对称不稳定(朱乾根等，2007)。图5为 $\theta_{se}$ 、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°~31°N）800~550 hPa  $\theta_{se}$ 等值线坡度

173 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  
 174 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~  
 175 500 hPa和800~700 hPa  $\theta_{se}$ 等值线坡度大于地转绝对动量坡度，条件性对称不稳  
 176 定仍存在，此时29°~31°N的锋面上空800 hPa以上均为上升气流，且上升速度较  
 177 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  
 178 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  
 179 等，2017；郭大梅等，2018）。



180  
 181 图5 2024年2月21日沿120°E的 $\theta_{se}$ （实线，单位：K）、地转绝对动量（虚线，单位： $\text{kg m s}^{-1}$ ）  
 182 和垂直速度（填色）的垂直剖面

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

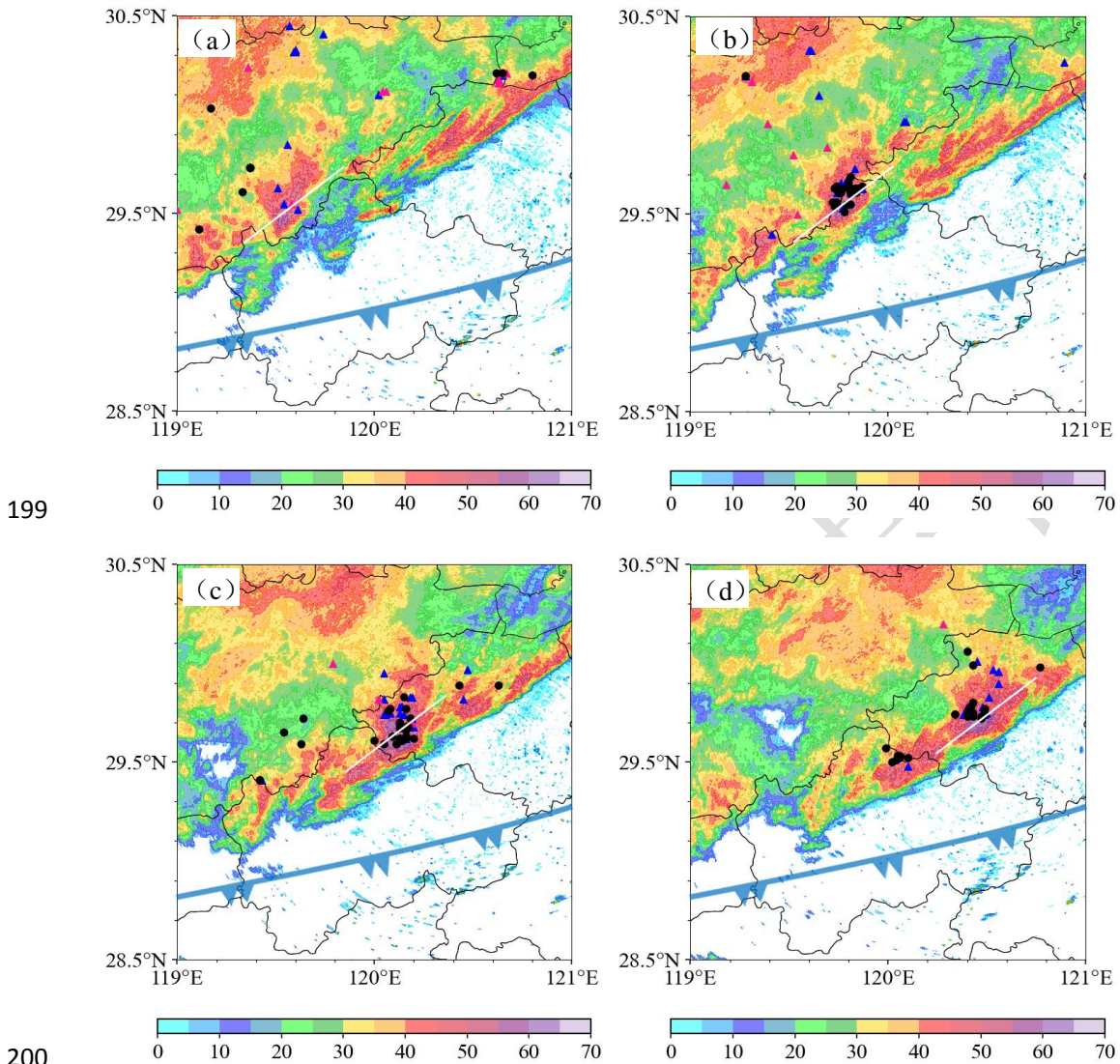
## 185 4 强风暴结构

### 186 4.1 强风暴演变和闪电分布

187 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14:00—15:00。  
 188 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  
 189 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4c，4d），因此风  
 190 暴在冷空气一侧有持续发展趋势。14:08移动至杭州建德境内（图6a），风暴已  
 191 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，  
 192 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  
 193 在后侧层状云区。14:19（图6b）， $\geq 55$  dBz的反射率因子大值区迅速扩大，云  
 194 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，  
 195 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  
 196 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，正负地闪分布在核



197 心后侧。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  
 198 次减少。



注: 白线为图7剖面位置。

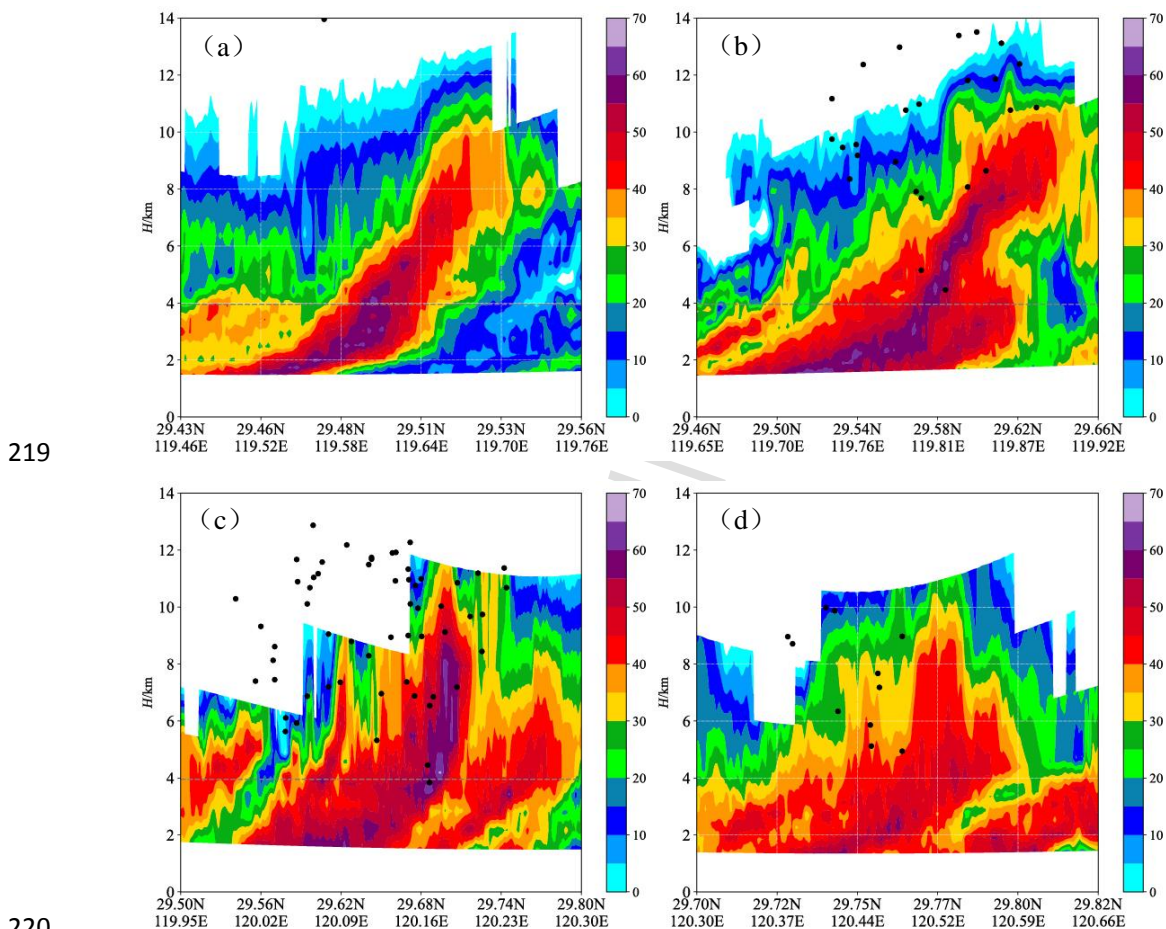
202 图6 2024年2月21日绍兴S波段雷达组合反射率因子(填色)、6 min 闪电活动分布

203 Fig.6 Composite reflectivity factor (colored) of Shaoxing S-band Radar  
 204 and corresponding flash distribution within 6 minutes on 21 February 2024

205

206 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  
 207 (图7)可知: 14:07(图7a),  $\geq 55$  dBz的反射率因子大值区向上延伸至5 km, 风  
 208 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  
 209 新生, 使得整个风暴表现为前倾结构。该时刻风暴系统垂直剖面内的云闪很少。  
 210 14:19(图7b),  $\geq 55$  dBz的强反射率因子扩展至7 km之上, 风暴质心高度升高表  
 211 明上升气流加强, 图5b显示上升气流中心高于600 hPa(约4 km), 因此更多粒

212 子被携带至0℃层（3.95 km）之上，该高度之上云闪频次显著增多，对应固态水  
 213 凝物粒子增多（Williams et al, 1989），有利于冰雹形成（朱乾根等，2007），  
 214 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  
 215 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  
 216 在4~13 km，表明0℃层之上的固态水凝物粒子更多。14:55（图7d），≥50 dBz  
 217 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  
 218 暴发展过程中云闪基本分布在4 km之上，即0℃层之上的强烈上升气流区内。



注：灰色虚线为0℃层高度。

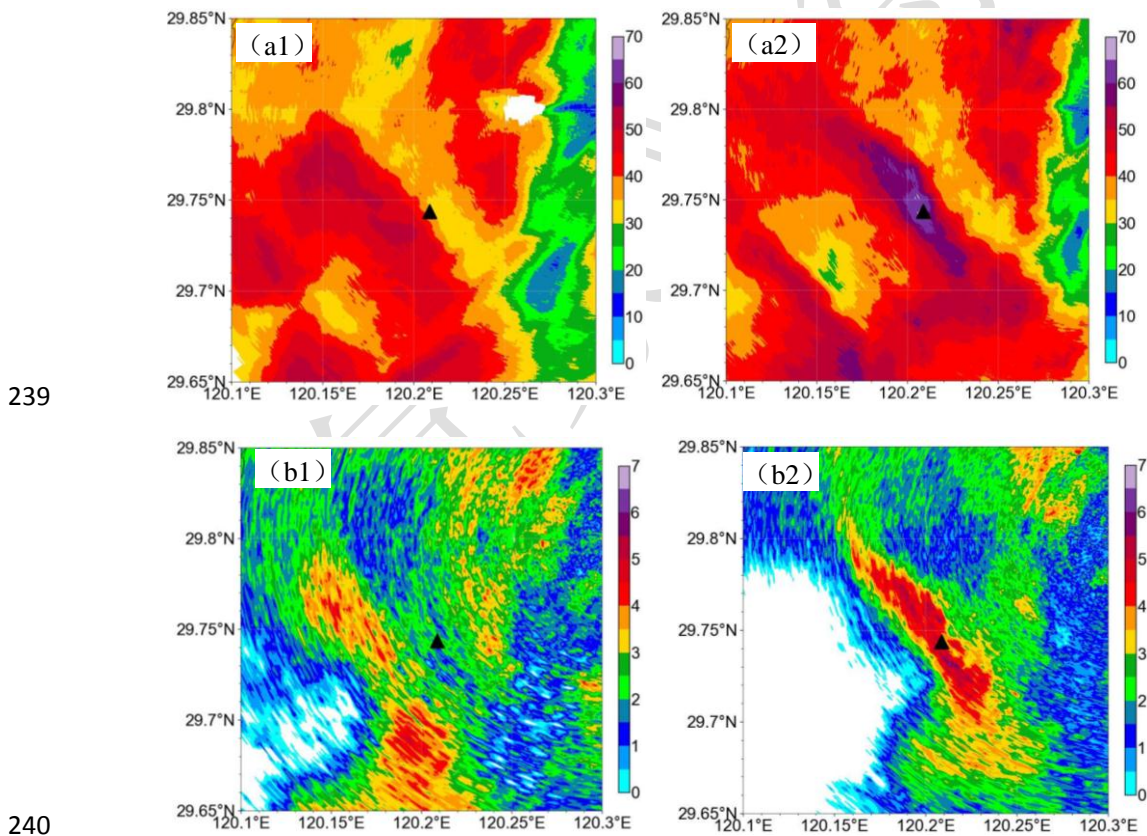
222 图7 沿图6中白线的反射率因子（填色）和云闪（黑点）的垂直剖面

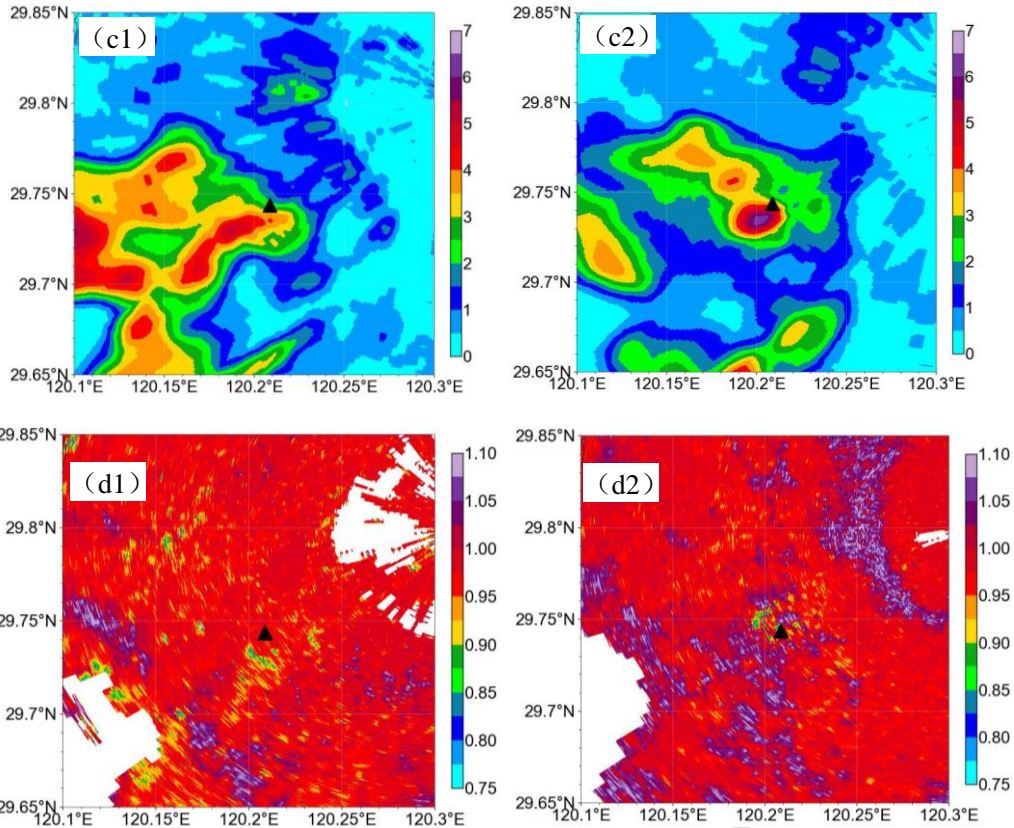
223

224 Fig. 7 Cross-section of reflectivity factor (colored ) and cloud flashes (black dots) along the white  
 225 lines in Fig. 6 respectively

226 **4.2 X 波段相控阵雷达特征分析**

227 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  
 228 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  
 229 段相控阵雷达系统的可探测范围，降雹区基本在探测范围内。图 8 为 14:39（绍  
 230 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约 440 m  
 231 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  
 232 （ $K_{DP}$ ）和相关系数（CC）。0.75°仰角上  $Z_H$  最大为 50 dBz 左右，而 8.25°仰角  
 233  $Z_H$  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  
 234 倾结构，且  $\geq 60$  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 30  
 235 dBz，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。 $Z_{DR}$   
 236 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  
 237 降雹点附近  $Z_{DR} \geq 1.5$  dB， $K_{DP} \geq 2 \text{ } \circ \cdot \text{km}^{-1}$ ，8.25°仰角  $Z_{DR} \geq 4.5$  dB， $K_{DP} \geq$   
 238  $2.5 \text{ } \circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。降雹点附近低层到近地面均存在 CC 谷值区( $CC \leq 0.9$ )。





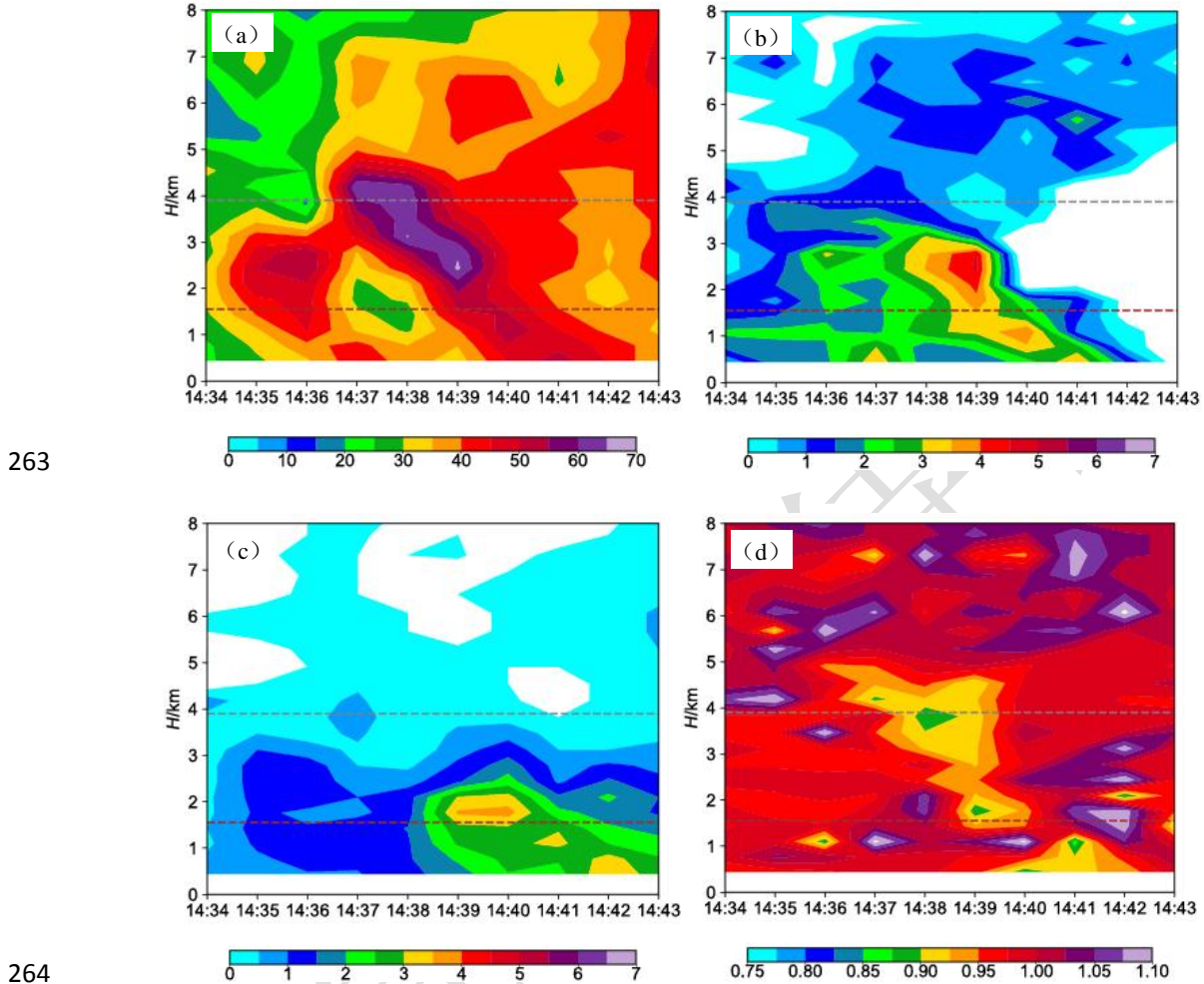
注：黑色三角形为降雹点。

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<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) Z<sub>H</sub>、(b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) Z<sub>DR</sub>、(c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) K<sub>DP</sub>、(d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>) CC分布

Fig. 8 Distribution of (a1, a2) Z<sub>H</sub>, (b1, b2) Z<sub>DR</sub>, (c1, c2) K<sub>DP</sub> and (d1, d2) CC at the (a1—d1) 0.75° and (a2—d2) 8.25° elevation of Shaoxing X-band Radar at 14:39 on 21 February 2024

分析该降雹站上空 Z<sub>H</sub>、Z<sub>DR</sub>、K<sub>DP</sub> 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 ≥60 dBz 的 Z<sub>H</sub> 核心，Z<sub>H</sub> 核心范围内 Z<sub>DR</sub> ≥ 1 dB，K<sub>DP</sub> ≥ 0.5 °·km<sup>-1</sup>，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<sub>H</sub> 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<sub>H</sub> 核心开始下沉，14:39 到达 2.5 km 附近，该高度上 Z<sub>DR</sub> ≥ 4.5 dB，K<sub>DP</sub> ≥ 2.5 °·km<sup>-1</sup>，CC ≥ 0.92，Z<sub>DR</sub> 和 K<sub>DP</sub> 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<sub>H</sub>、Z<sub>DR</sub> 和 K<sub>DP</sub> 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。当 14:41

260 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， $Z_{DR} \geq 3$   
 261 dB， $K_{DP} \geq 2 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ， $CC \leq 0.92$ ，并出现小范围  $CC \leq 0.9$ ，表明降落至地面的粒  
 262 子相态为雨夹雹。



263

264

265

注：灰色虚线为0°C层高度，棕色虚线为逆温层顶高度。

266 图9 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  
 267 Fig. 9 Time-height evolution of (a)  $Z_H$ , (b)  $Z_{DR}$ , (c)  $K_{DP}$ , (d)  $CC$  of Shaoxing X-band Radar over  
 268 the hail site

## 269 5 结论

270 本文基于ERA5再分析资料、自动气象观测站、闪电定位仪、S波段双偏振雷  
 271 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  
 272 和风暴结构。主要结论如下：

273 (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  
 274 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

275 面到850hPa附近有深厚的逆温层, 0~6km垂直风切变超过 $24 \text{ m s}^{-1}$ , 具备高架雷  
276 暴发生发展的有利环境条件。

277 (2) 浙江中北部上空逆温层之上 $\theta_{se}$ 随高度减小, 同时, 中层 $\theta_{se}$ 等值线坡度大于  
278 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  
279 时存在, 即对流-对称不稳定机制, 两种不稳定存在的层次相近。来自低层的暖  
280 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  
281 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。

282 (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, 下游为不稳定  
283 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。风  
284 暴发展高度升高, 上升气流加强,  $0^{\circ}\text{C}$ 层之上的云闪频次逐渐增多, 对应固态水  
285 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,  
286 云闪主要分布在4km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  
287 单体结构的分析表明:  $Z_H$ 核心最初位于 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度之上, 包含较多固态水凝物粒  
288 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  
289 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  
290 凝固, 降至地面时为雨夹雹。

291

292

## 293 参考文献

- 294 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,  
295 38(6): 836-844. Chen X X, Qian H Z, Zhou B, et al, 2015. Cause analysis of a snowstorm case with elevated  
296 thunderstorm in southern Jiangsu province[J]. Trans Atmos Sci, 38(6): 836-844 (in Chinese).
- 297 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):  
298 995-1004. Dong Y N, Liu F X, Sun H P, et al, 2023. A study on dynamic effect of hail suppression by  
299 anti-hail gun with phased array radar[J]. Meteor Mon, 49(8): 995-1004 (in Chinese).
- 300 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  
301 学报, 36(4): 528-541. Gou A N, Gao Z X, Hou J, et al, 2020. Analysis of lightning and precipitation activities  
302 in three elevated convective events based on Doppler radar and Microwave Radiometer in Hubei province[J].  
303 J Trop Meteor, 36(4): 528-541 (in Chinese).
- 304 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.  
305 Guo D M, Zhang L N, Wang X M, et al, 2018. Analysis on elevated thunderstorm in Shaanxi in early winter  
306 of 2016[J]. Meteor Mon, 44(11): 1404-1413 (in Chinese).
- 307 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,  
308 Lu Y B, Gao A S, et al, 2009. Analysis on mesoscale characteristic of rare thunderstorm snow weather in low  
309 Latitude Plateau[J]. Meteor Mon, 35(2): 49-56 (in Chinese).

310 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,  
311 75(3): 429-441. Huang X G, Fei J F, Sun J M, et al, 2017. Analysis on the formation mechanism of an  
312 elevated thunderstorm over the middle and lower Yangtze Basin in February 2013[J]. Acta Meteor Sin, 75(3):  
313 429-441 (in Chinese).

314 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,  
315 Zhang Y, Luo C, 2013. Analysis of a rare, elevated thunderstorm in northern Guangdong in the early spring of  
316 2012[J]. Guangdong Meteor, 35(3): 1-5 (in Chinese).

317 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,  
318 17(4): 7-15. Li M M, Wang Y, Zhu B, et al, 2023. Multi-source observation characteristics and causes of an  
319 abrupt snowfall in Jianghuai region[J]. Desert Oasis Meteor, 17(4): 7-15 (in Chinese).

320 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):  
321 541-553. Li S X, Yuan X C, Wang G A, et al, 2023. Synoptic conditions and radar characteristics for elevated  
322 thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province[J]. Torrential Rain Disaster, 42(5): 541-553 (in  
323 Chinese).

324 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[J]. 气象科技进展, 6(3):  
325 28-33. Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and  
326 phased-array radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 28-33 (in Chinese).

327 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):  
328 1596-1607. Liu X Y, Yu H P, Sheng X, et al, 2020. Mechanism analysis of a rare “thunder snow” process in  
329 semi-arid area[J]. Meteor Mon, 46(12): 1596-1607 (in Chinese).

330 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  
331 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  
332 background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations[J]. Acta Meteor  
333 Sin, 80(5): 748-764 (in Chinese).

334 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,  
335 Mao D Y, Shen X Y, et al, 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in  
336 China during spring[J]. Meteor Mon, 40(9): 1058-1065 (in Chinese).

337 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  
338 D B, Jiao R G, Lü D R, 2012. Mesoscale observation analysis of a winter snowstorm with thunder and  
339 lightning in Beijing area[J]. Meteor Mon, 38(2): 204-209 (in Chinese).

340 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):  
341 229-244. Su Y Y, Liu L P, 2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual  
342 polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. Meteor Mon, 48(2): 229-244 (in Chinese).

343 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):  
344 562-572. Wang N, Yang X B, Yang C F, 2023. Cause analysis of a rare regional “thunder snow” process in  
345 Shandong in 2021[J]. Meteor Sci Technol, 51(4): 562-572 (in Chinese).

346 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,  
347 Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basic issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon,  
348 40(4): 389-399 (in Chinese).

349 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.  
350 Wu N G, Lin L X, Feng Y R, et al, 2013. Analysis on the causes of an elevated thunderstorm in early-spring  
351 of South China[J]. Meteor Mon, 39(4): 410-417 (in Chinese).

352 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日短时强降水天气过程的分析[J].

353 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  
354 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. Meteor Mon, 48(7): 826-839 (in Chinese).

355 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):  
356 197-206. Xu A H, Chen Y H, Chen T, et al, 2013. Environment characteristics and causes of a continuous hail  
357 fall event occurred within the cold air mass to the north of a cold front[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2): 197-206  
358 (in Chinese).

359 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].  
360 气象, 45(3): 330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South  
361 China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3): 330-344 (in  
362 Chinese).

363 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,  
364 Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe  
365 convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 311-337 (in Chinese).

366 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,  
367 Zhou X G, Wang X M, 2016. A preliminary case study of elevated convection in China[J]. Acta Meteor Sin,  
368 74(6): 902-918 (in Chinese).

369 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.  
370 Zhang W, Chen L, Huang H R, et al, 2023. Meso-scale structure analysis of an elevated thunderstorm in  
371 southwest Fujian[J]. J Trop Meteor, 39(1): 55-65 (in Chinese).

372 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):  
373 192-204. Zhang X, Huang X Y, Liu X A, et al, 2022. The hazardous convective storm monitoring of  
374 phased-array antenna radar at Daxing international airport of Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2): 192-204  
375 (in Chinese).

376 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.  
377 Zhang Y P, Yu X D, Sun J L, et al, 2014. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in  
378 early spring 2012[J]. Meteor Mon, 40(1): 48-58 (in Chinese).

379 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,  
380 27(1): 81-86. Zhang Y, Bai L Q, Meng Z Y, et al, 2021. Rapid-scan and polarimetric phased-array radar  
381 observations of a tornado in the Pearl River estuary[J]. J Trop Meteor, 27(1): 81-86.

382 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,  
383 39(2): 218-229. Zhang Y, Chen B H, Zeng L, et al, 2023. X-band dual-polarization phased-array radar  
384 observations of a supercell[J]. J Trop Meteor, 39(2): 218-229 (in Chinese).

385 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,  
386 Jin J, 2012. Analysis on formation mechanism of rare ‘thundersnow’ phenomenon in Shandong on 28  
387 February 2010[J]. Plateau Meteor, 31(4): 1151-1157 (in Chinese).

388 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,  
389 Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principle and Method of Synoptic Meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China  
390 Meteorological Press: 393-396 (in Chinese). Colman B R, 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in  
391 environments without positive CAPE. Part I: a climatology[J]. Mon Wea Rev, 118(5): 1103-1122.

392 Colman B R, 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II:  
393 organization and instability mechanisms[J]. Mon Wea Rev, 118(5): 1123-1144.

394 Grant B N, 1995. Elevated cold-sector severe thunderstorms: a preliminary study[J]. Natl Wea Dig, 19(4): 25-31.

395 Markowski P, Richardson Y, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester: John Wiley & Sons



|

396 Ltd.

397 Williams E R, Weber M E, Orville R E, 1989. The relationship between lightning type and convective state of  
398 thunderclouds[J]. J Geophys Res: Atmos, 94(D11): 13213-13220.

399

400

401

402

