

万夫敬,李博,罗江珊,等,2024.一次伴随高架雷暴的极端暴雪不稳定机制分析[J].气象,50(9):1105-1119. Wan F J, Li B, Luo J S, et al, 2024. Analysis of instability mechanism of an extreme blizzard accompanied by elevated thunderstorms[J]. Meteor Mon, 50(9): 1105-1119 (in Chinese).

一次伴随高架雷暴的极端暴雪不稳定机制分析*

万夫敬¹ 李 博² 罗江珊¹ 侯淑梅³ 庞华基¹

¹ 青岛市气象局, 青岛 266003

² 山东省菏泽市气象局, 菏泽 274100

³ 山东省气象台, 济南 250031

提 要: 利用常规观测资料、闪电定位监测、雷达资料和 ERA5 再分析资料等, 分析了 2023 年 12 月 14 日山东地区的一次“雷打雪”天气过程的不稳定机制, 利用锋生函数、假相当位温的密集区和地面温度的变化特征等, 确定了地面冷锋的位置, 结合物理过程的触发和不稳定机制, 给出了高架对流暴雪的概念模型。结果表明: 雷暴和强降雪出现在地面冷锋后部, 低空有深厚稳定的冷垫, 逆温层之上存在强盛的暖湿空气, 具有产生高架雷暴的环境。暴雪发生期间, 存在对流-对称不稳定机制, 且对称不稳定和位势不稳定存在于不同层次上: 对称不稳定主要位于 700 hPa 以下, 当暖湿气流沿低层冷垫强迫爬升, 倾斜对流发展; 而位势不稳定位于 700~500 hPa, 是伴随中低层西南急流的推进逐步建立的。当对称不稳定导致的倾斜对流发展到 700~500 hPa 层次时, 位势不稳定能量得以释放, 发展出深厚强烈的垂直对流。位势不稳定的建立与 700~500 hPa 上 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速前沿的向北推进在时间上具有高度的一致性, 超前于最强降雪和雷电, 提前 1~2 h。高架雷暴的触发除了低层冷垫的动力抬升外, 还与中层 700~500 hPa 附近风速的增强有关, 700~500 hPa 风速增强后, 槽前正涡度平流加强, 上升气流发展, 进而触发对流, 造成强降雪和强烈、高频的雷电活动。尽管本次高架雷暴强降雪时段的回波主要集中在 20~35 dBz, 但回波顶高超过了一 30°C 层高度, 35 dBz 回波伸展到达一 10°C 层高度之上, 仍需高度关注冬季雷电的发生。

关键词: 雷打雪, 极端暴雪, 高架雷暴, 对流-对称不稳定

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.071201

Analysis of Instability Mechanism of an Extreme Blizzard Accompanied by Elevated Thunderstorms

WAN Fujing¹ LI Bo² LUO Jiangshan¹ HOU Shumei³ PANG Huaji¹

¹ Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003

² Heze Meteorological Office of Shandong Province, Heze 274100

³ Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Based on conventional observation, three-dimensional lightning locator, Doppler weather radar and ERA5 reanalysis data, the characteristics of a convective event on 14 December 2023 in Shandong Province are analyzed. The position of the ground cold front is determined by using the frontogenesis function, the dense zone of pseudo-equivalent temperature, and the temperature variation. A conceptual model diagram of the physical process is proposed. The results show that thunderstorm and heavy snowfall occurred at the rear of the ground cold front, with a deep and stable cold cushion in the low altitude, and

* 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD010、ZR2021MD062、ZR2023MD118)、山东省预报员专项(SDYBY2019-07、SDYBY2017-06)、淮河流域基金项目(HRM201807)、山东省气象局创新团队项目(SDCXTD2023-1)和青岛市气象局重点课题(2023qdxz02)共同资助

2024 年 3 月 6 日收稿; 2024 年 7 月 12 日收修定稿

第一作者: 万夫敬, 主要从事强对流天气研究. E-mail: 1005418392@qq.com

通讯作者: 侯淑梅, 主要从事强对流天气研究. E-mail: shmh0808@163.com

strong warm and humid air above the temperature inversion layer, forming the environment for elevated thunderstorm. During the blizzard, there was convective-symmetric instability, and the symmetric instability and potential instability were at different levels. The symmetric instability was below 700 hPa, and the tilting convection developed during the forced uplift of warm and humid air flow along the low-level cold cushion. The potential instability was located at 700–500 hPa and was established with the advancement of the southwest jet. When the tilting convection caused by symmetric instability reached a level of 700–500 hPa, the energy of potential instability was released, leading to the development of deep and strong vertical convection. The establishment of potential instability was consistent with the northward advance of $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wind speed at 700–500 hPa, which was 1–2 h ahead of the heaviest snowfall and thunder. The triggering of elevated thunderstorm was not only related to the uplift of the low-level cold cushion, but also to the enhancement of wind near 700–500 hPa in the middle layer. With the increase of wind speed at 700–500 hPa, the positive vorticity advection was strengthened, and then the upward airflow further developed, causing severe snowfall and high-frequency lightning. The convective property of this elevated convection was not typical and the echo intensity was mainly concentrated in 20–35 dBz, but the echo top height exceeded the -30°C layer height and the 35 dBz echo extended above the -10°C layer height. Therefore, it is still necessary to pay close attention to the occurrence of lightning in winter.

Key words: thundersnow, extreme blizzard, elevated thunderstorm, convective-symmetric instability

引 言

山东冬季降水一般为稳定性过程,但当南支槽强烈发展,暖湿空气旺盛,会伴有雷暴活动,称为“雷打雪”,该类天气因其可能伴有强降雪、雷电和冰雹等现象,且精准预报预警难度大,容易造成人员伤亡和财产损失,从而引起社会高度关注(王仁乔和宋清翠,1990;胡顺起等,2017;杜佳等,2019;李姝霞等,2023;李博等,2023;王宁等,2023)。学者们针对“雷打雪”展开了大量的个例研究,取得了一系列成果。丁栋生和李树林(1993)指出上干冷、下暖湿是这类事件发生的不稳定机制。翟亮等(2018)、周雪松等(2013)指出对流层中层增温、增湿及适宜的触发机制是该类对流天气产生的关键。郑丽娜等(2019)将山东地区的“雷打雪”事件分为暖平流型和海效应型两类,并对比分析了两类事件发生时有关要素场特征。近年来,研究发现“雷打雪”事件通常是由嵌入层状云中的高架对流单体所造成的(Holle et al, 1998; Trapp et al, 2001; Maesaka et al, 2003; 胡玲等,2020;周芳等,2021)。尤红等(2010)分析了云南省的一次“雷打雪”天气,发现其发生的高度是在对流层中高层。刘晓岳等(2020)研究指出青藏高原地区的地基雷暴移动到冷垫之上形成的高架雷暴,造成了兰州一次“雷打雪”。陈潇潇等(2015)认为苏南

地区一次大范围强降雪属于冷区高架对流过程。以上研究均表明“雷打雪”天气与冷季高架对流关系密切。

Means(1952)发现有一类雷暴与经典的雷暴不同,其暖湿抬升层次不在近地面而是在 850 hPa 以上。Colman(1990a;1990b)首次提出高架雷暴的概念,指出高架雷暴是位于边界层以上的雷暴,通常发生在无对流有效位能、但具有条件性对称不稳定的区域附近。中国的高架对流研究起步较晚,俞小鼎等(2012;2016;2020)指出高架对流常伴随有较强的冷垫及锋面逆温,来自地面的气块难以穿越逆温层获得浮力,但逆温层以上的气块则可以通过对流层中低层辐合切变线、锋面环流上升支或大振幅的中尺度重力波的抬升而触发对流。孙继松等(2014)系统地总结和概括了中国不同区域高架雷暴天气的形势配置、热动力结构、造成的天气以及不同区域高架雷暴的特殊性。盛杰等(2014)对 3 年的中国春季冷锋后高架对流个例进行了分析,指出其主要发生在我国南方地区,预报着眼点为 850 hPa 和 700 hPa 大气相对湿度在 70% 以上,700 hPa 与 500 hPa 的温差达 16°C 以上。曹舒娅等(2018)对冷季江苏地区 12 次典型的高架雷暴进行分析,表明强垂直风切变、850 hPa 附近强烈的锋生导致的锋面次级环流,高空槽前正涡度平流随高度增加等,为高架雷暴的发生和维持提供了动力抬升条件。刘洲洋等(2018)

对泛华北地区 16 年的冷季高架对流研究后发现,河南中北部、山东西部及河北中南部是多发地带,2 月和 11 月是冷季高架对流发生最多的月份,但 12 月由于被抬升的近地面空气温度较低,对流难以触发和维持,发生概率大幅降低。另外,吴乃庚等(2013)、张一平等(2014)、陈淑琴等(2019)、冯丽莎等(2020)和齐道日娜等(2024)也进行了相关的研究。

2023 年 12 月 14 日,山东出现了一次极端强降雪并伴有雷暴事件,影响范围广,持续时间长,闪电密度大,引起气象工作者、媒体和民众的高度关注。本次过程最大降雪量和最大小时降雪量分别为 26.6 mm(大暴雪)和 7.6 mm,多站突破历史同期极值。在 12 月中旬气温如此低、对流难以触发和维持的气候大背景下,雷暴产生和维持的不稳定机制值得关注和深入分析。本文利用常规观测资料、闪电定位资料、雷达资料和 ERA5 再分析资料等,从不稳定机制角度出发,探讨其热动力学成因,以期为冬季强对流暴雪预报提供有价值的参考,提高公共气象服务能力。

1 天气实况

2023 年 12 月 13—15 日,华北南部、黄淮地区出现一次持续性大范围雨转雪天气,其中 14 日山东地区降水特征最为复杂,08:00 前(北京时,下同),鲁西北和鲁中以降雨为主,之后伴随着冷空气持续补充,自西向东由雨、雨夹雪、冻雨或冰粒转为降雪。鲁西北、鲁中等多地监测到较强雷电活动(图 1),集

中出现在 14 日 11:00—16:00。11:00—16:00,山东境内共探测到总闪 99 次(云闪 27 次,地闪 72 次),其中正(+)地闪 27 次,负(-)地闪 45 次。14:00 总闪和地闪频次达到峰值,分别为 53 次和 36 次,地闪约占总闪的 68%,最大雷电流强度为 91.71 kA(13:57,滨州市博兴县境内)。强降雪主要发生在 14 日午后,降雪量极端,累计雪量大,14 日 08:00 至 15 日 08:00 有 28 个站达到暴雪及以上量级,平原等 8 个站出现大暴雪(平原站最大,26.6 mm),临清等 23 个站降雪量突破本站 12 月历史极值。降雪强度大,最大小时降雪量为 7.6 mm(平原站,14 日 13:00—14:00)。过程期间,鲁西北和鲁中出现明显积雪,最大积雪深度达 23 cm(德州夏津和平原),造成城市运行和交通运输受阻,对人民生活造成较严重影响。

2 环流背景

14 日 08:00,500 hPa 中高纬度地区从贝加尔湖到新疆为东北—西南走向的横槽,槽底有短波槽分裂东移,横槽前部风场与温度场近乎正交,冷平流显著。山东位于宽广的河套短波槽前,西太平洋副热带高压位置偏西偏北,588 dagpm 线与 120°E 经线相交于 28°N 附近,120°~130°E 有沿海高压脊形成下游阻挡形势。南支系统活跃,槽前西南暖湿气流发展旺盛。700 hPa(图 2a)环流的经向度大,河套北部西风槽后伴随显著冷锋东移,温度梯度大,10 个纬度内温差近 20°C;南支槽前有强西南低空急流,与温度场的夹角大,暖湿平流强盛,黄淮地区暖

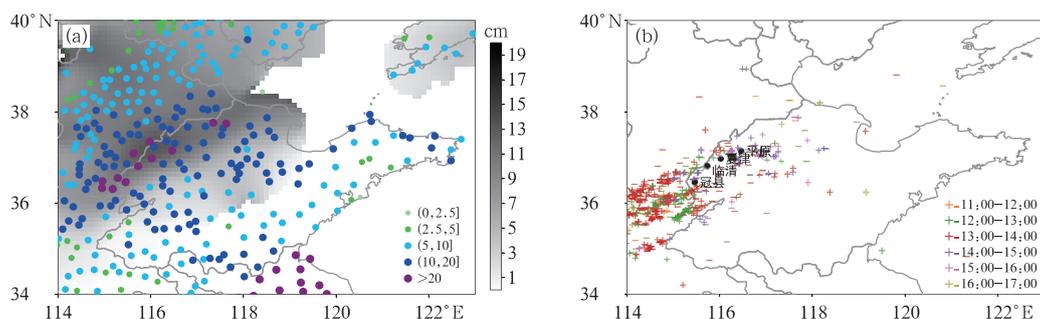
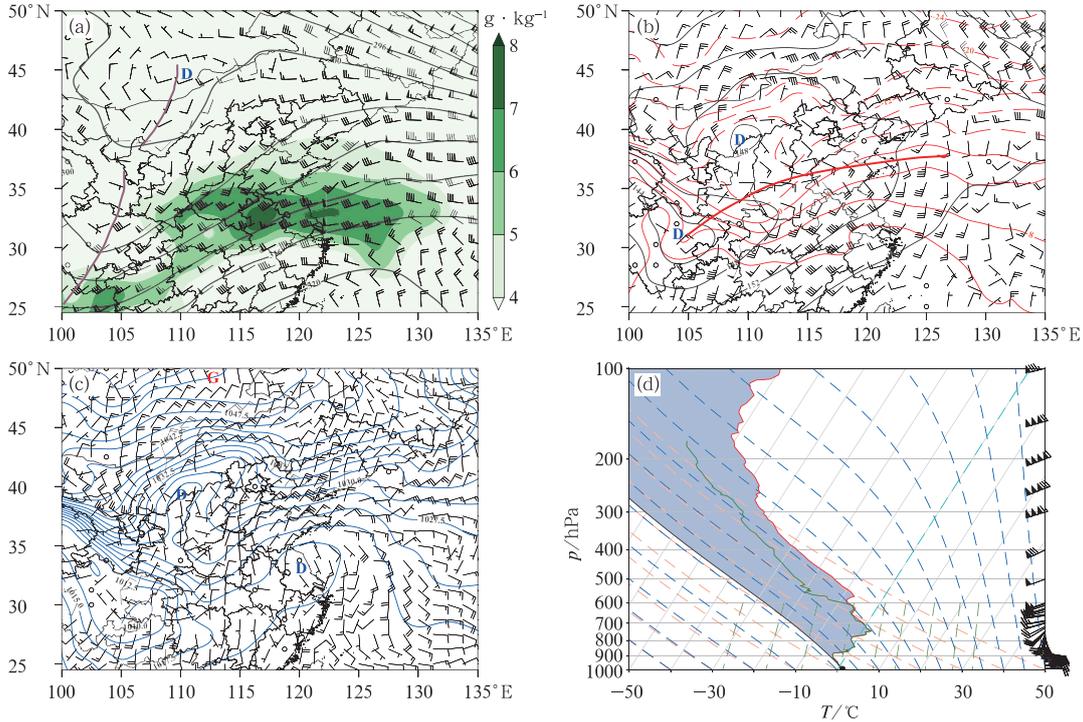


图 1 2023 年 12 月 14 日 08:00 至 15 日 08:00(a)降雪量(散点,单位:mm)和积雪深度(阴影),
(b)逐小时雷电落区(+、-)分布和部分站点的位置

Fig. 1 Distribution of (a) precipitation (scattered dot, unit: mm) and snow depth (shaded)
and (b) hourly lightning strike area (+, -) and the location of some stations
from 08:00 BT 14 to 08:00 BT 15 December 2023



注:图 a 中粗棕色线为槽线,图 b 中粗红色线为切变线,D 为低值中心,G 为高值中心。

图 2 2023 年 12 月 14 日天气形势

- (a)08:00 700 hPa 风场(风羽)、位势高度(黑线,单位:dagpm)和比湿(填色),
 (b)08:00 850 hPa 风场(风羽)、位势高度(黑线,单位:dagpm)和等温线(细红线,单位:℃),
 (c)11:00 地面等压线(蓝线,单位:hPa)、风场(风羽),(d) 08:00 济南章丘站探空图

Fig. 2 Synoptic situation on 14 December 2023

- (a) wind field (barb), geopotential height (black line, unit: dagpm) and specific humidity (colored) at 700 hPa at 08:00 BT, (b) wind field (barb), geopotential height (black line, unit: dagpm) and isotherm (red thin line, unit: °C) at 850 hPa at 08:00 BT, (c) ground isobar (blue line, unit: hPa) and wind field (barb) at 11:00 BT, (d) sounding chart at Zhangqiu Station in Jinan at 08:00 BT

脊伸向华北。山东位于低空急流轴的左前侧(山东东南部最大风速可达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上),有明显的风速辐合。700 hPa 强盛西南急流为过程提供了充足的水汽,山东地区比湿为 $5 \sim 7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到了本地区暴雪的预报指标(杨成芳等,2013;阎丽风和杨成芳,2014)。中层较强的暖湿平流,一方面提供了有利的水汽条件,另一方面使逆温层上的不稳定层结不断加强。850 hPa(图 2b)西南涡东侧有暖式切变线向山东中南部伸展,山东地区等温线较密集,大气斜压性强。925 hPa 切变线位于江苏中部,有超低空东北气流,最大可达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。14 日 08:00—11:00,地面图上寒潮冷高压中心(1080 hPa)在贝加尔湖西部,冷高压控制我国东北、华北地区,江苏中部地区有倒槽北伸,山东地区等压线密集(图 2c),处于地面冷高压前部和倒槽北部的东北气流中。

200 hPa 处于高空急流轴附近,高空动力抽吸作用显著。

14 日 08:00 章丘探空资料显示(图 2d),900 hPa 以下以东北风为主,形成了较为稳定的冷垫,冷垫底部和顶部的温差达 $4.6 \text{ }^\circ\text{C}$,700~500 hPa 为一致的西南气流,在冷垫之上和 700 hPa 之间有多层逆温,最强逆温出现在 870 hPa 附近,93 m 的高度内气温升高了 $3.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。低层冷垫配合 900~740 hPa 强的逆温层,有利于高架雷暴的发展和维持。700 hPa 以下温度和露点温度完全重合,对流不稳定能量弱,仅为 $0.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但垂直风切变非常强,0~6 km、0~3 km 风矢量差分别为 $30.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $16.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大气有强的动力不稳定和斜压性,强垂直风切变和对流层中低层的暖湿气流,为冬季对流性天气的发生提供了动力和热力不稳定条件。

3 “雷打雪”天气形成的物理机制

3.1 强降雪前低层冷垫的形成

对流天气发生在地面冷锋后部是高架雷暴区别于地基雷暴的重要特征之一。在地面形势场上,山东地区南部是倒槽北侧的东北气流,北部有回流而下的冷空气,山东全境均为东北风(图 2c)。本文利用锋生函数 F 、假相当位温的密集区和温度的变化特征相互印证,确定这是一次高架雷暴过程。锋生函数 F 采用式(1)计算(朱乾根等,2000), $F > 0$ 时为锋生, $F < 0$ 时为锋消。

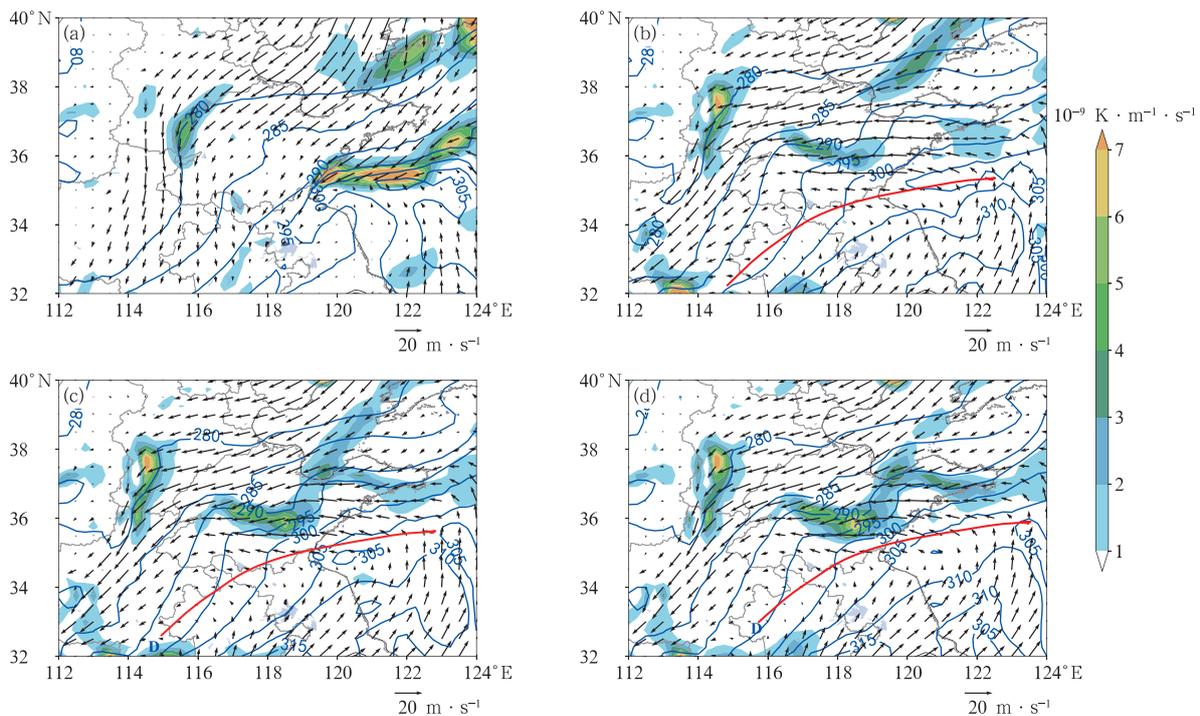
$$F = \frac{1}{2} |\nabla\theta| [D\cos(2\beta) - \delta] \quad (1)$$

式中: D 为水平风切变(变形项), δ 为散度, β 为膨胀轴与等位温线的夹角, θ 为位温。

从图 3 锋生函数、假相当位温(θ_{se})和风场的配合来看,14 日 08:00 1000 hPa 层锋生函数和假相当

位温梯度密集区位于山东东部沿海(图 3a),锋生函数大正值中心配合假相当位温梯度大值区,说明地面冷锋前沿已到达山东东南部海上。同时,925 hPa 鲁中地区锋生带较显著,锋生函数梯度大值轴随高度明显向北倾斜,925 hPa 冷锋前沿影响到鲁中。鲁中地区锋生函数最大值为 $3 \times 10^{-9} \sim 4 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3b),之后锋面继续加强南压,10:00—11:00 925 hPa 鲁中南部锋生函数中心值增大至 $5 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3c,3d)。因此,在高架雷暴发生时,鲁西北、鲁中西部地区处于地面和低层冷锋的后部,雷暴出现在地面先行冷锋后 350 km,925 hPa 锋生区 110 km 左右。

地面加密自动气象站资料分析发现(图 4),在山东地区强降雪开始前,低层冷空气活跃,冷空气取偏东路径自华北东部回流,持续补充南下。14 日 08:00—14:00,通常由于气温的日变化,此阶段气温应逐步升高,但鲁西北、鲁中地区的气温不升反降。以鲁西北地区的夏津站为例,05:00 气温为 -0.4°C ,08:00 气温升高了 1.0°C ,为 0.6°C ,而 11:00 气温



注:粗红线为切变线。

图 3 2023 年 12 月 14 日锋生函数(填色)、假相当位温(蓝实线,单位:K)和风场(风矢)

(a)1000 hPa 08:00,(b)925 hPa 08:00,(c)925 hPa 10:00,(d)925 hPa 11:00

Fig. 3 Function of frontogenesis (colored), θ_{se} (blue solid line, unit: K) and

wind field (vector) on 14 December 2023

(a) 1000 hPa 08:00 BT, (b) 925 hPa 08:00 BT, (c) 925 hPa 10:00 BT, (d) 925 hPa 11:00 BT

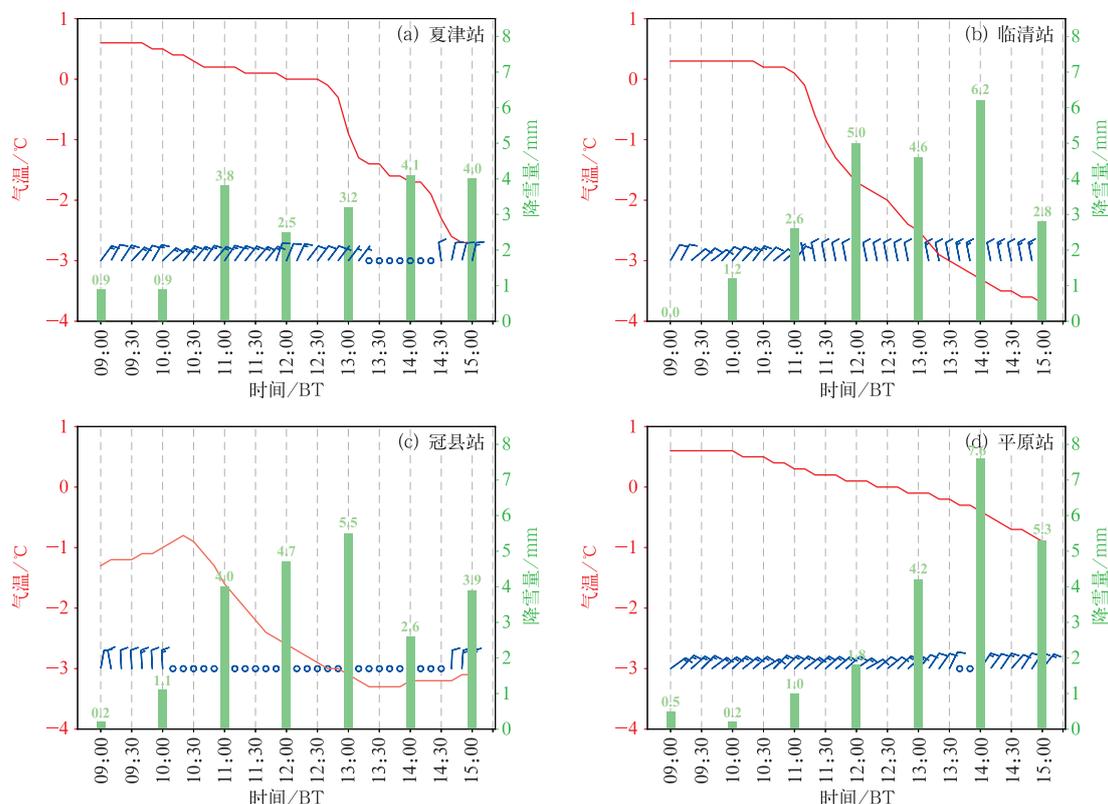


图 4 2023 年 12 月 14 日自动气象站站点气象要素时间序列

Fig. 4 Time-series of meteorological elements at automatic weather stations on 14 December 2023

下降为 0.2°C , 14:00 为 -1.7°C (图 4a); 临清站 05:00 气温为 -1.1°C , 一直到 08:50 气温升高 1.5°C , 为 0.4°C , 11:00 气温开始持续显著下降, 为 0.1°C , 12:00 为 -1.7°C , 13:00 为 -2.5°C , 14:00 为 -3.3°C , 15:00 为 -3.5°C (图 4b); 鲁西南的站点也有类似的特征, 冠县站 07:00 气温为 -1.6°C , 10:00 气温有所升高为 -1.0°C , 10:00—11:00 气温开始下降, 11:00 为 -1.6°C , 12:00 为 -2.6°C , 13:00 为 -3.0°C (图 4c)。与此相配合, 鲁西北、鲁中地区低层东北风速稍有增强。平原站为 24 h 最大降雪量和最大小时降雪量站 (图 4d), 其气温下降趋势较缓, 但东北风力相对其他站更加强劲, 同样具备以上三站相似的特征。11:40 前后, 山东冠县东南侧 15 km 以内 (36.4°N 、 115.6°E) 初次监测到雷电活动, 之后山东地区的雷电活动逐渐活跃, 13:00—14:00 最为密集, 因此, 在强降雪和雷电产生前, 低层的冷垫已经形成, 符合冬季高架雷暴的结构配置 (俞小鼎等, 2020), 强降雪与地面冷锋后部、低层冷垫之上的高架雷暴活动密切相关。

3.2 强降雪的不稳定机制

对于高架对流, 俞小鼎等 (2016; 2020) 指出其不

稳定机制有如下三种: 条件性不稳定引起的垂直对流; 条件性对称不稳定引起的倾斜对流; 近湿中性条件下由锋生运动引起的强迫对流。统计发现, 高架雷暴典型的动力学不稳定机制为条件性对称不稳定 (农孟松等, 2013; 黄小刚等, 2017; 马曼曼, 2021); 但泛华北地区的不稳定机制通常是由条件性对称不稳定和锋生运动引起的 (刘洲洋等, 2018)。另外, 有研究指出对流性雨带中还存在位势不稳定和对称不稳定共存的情况 (费建芳等, 2009; 王宗敏等, 2014)。

济南章丘站 08:00 探空显示, 冷垫之上大气层结递减率接近湿绝热递减率或存在逆温, 但露点温度分布为“下湿上干”, 600 hPa 以下均为湿层, 此时可能存在条件稳定的气层经过低层冷垫的整层抬升后, 导致条件不稳定的情况, 即位势不稳定或对流不稳定。其产生的判据是假相当位温随高度递减 (王秀明等, 2014; 俞小鼎等, 2020), 即:

$$\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} < 0 \quad (2)$$

对称不稳定是在惯性稳定和对流稳定的情况下, 气块做斜升运动时产生的不稳定, 锋面附近带状雨带的形成通常与对称不稳定机制有关。本文采用湿位涡 (MPV) 作为条件性对称不稳定的判据。湿

位涡作为综合反映大气动力、热力和水汽作用的物理量,被广泛应用到暴雪分析中(齐道日娜等,2024;章丽娜等,2018)。湿位涡可分为两个部分:

$$\text{MPV1} = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (3)$$

$$\text{MPV2} = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

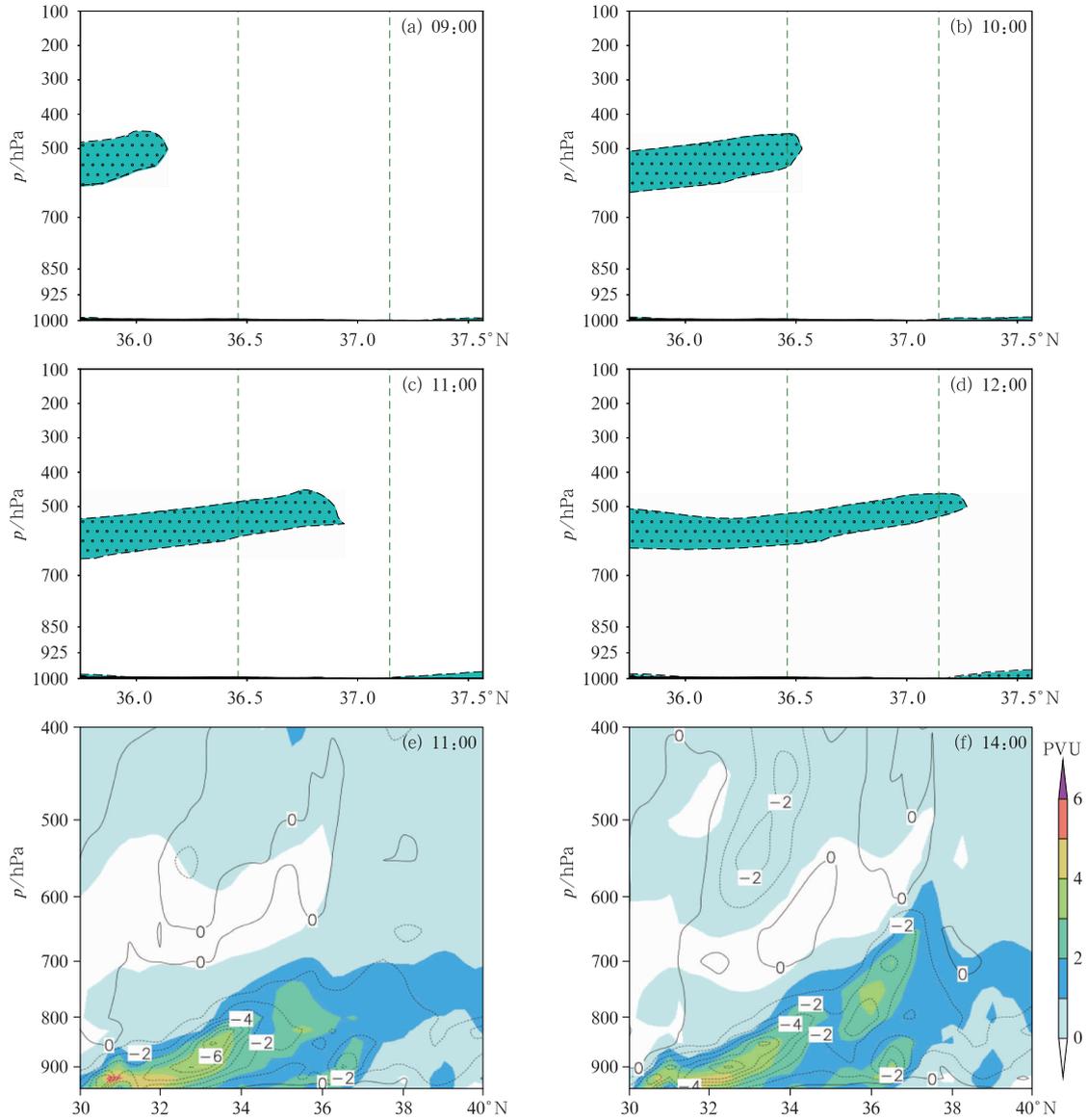
式中:MPV1为湿位涡的垂直分量(湿正压项),MPV2为湿位涡的水平分量(湿斜压项)。若大气为对流稳定时,MPV1>0。MPV2包含了水平风速和湿斜压锋区,本质上是判断条件性对称不稳定的一个判据,MPV2<0代表存在条件对称不稳定,且绝对值越大,说明风的垂直切变和大气斜压性越强(孙继松等,2014;王宁等,2023)。当满足MPV1>0和MPV2<0时,表示大气为对流稳定状态,但仍可以发展斜升气流,即存在条件性对称不稳定。

由于高架雷暴的触发层是在冷垫之上,分析此阶段冷垫之上的锋生函数发现,850 hPa及以上层次锋生函数极小或为锋消区,无明显的锋生(图略),因此由锋生运动引起的次级环流强迫不是本次过程的主要不稳定机制。沿700 hPa西南低空急流方向对强降雪发生前的不稳定参数进行垂直剖面(图5a~5d)。对比同时刻图5a~5d位势不稳定区的时间演变特征和图6中700~500 hPa中低空急流发现,位势不稳定是在雷暴发生前期伴随着700~500 hPa中低空急流向北推进,逐渐建立并加强,与中低层西南急流的北推在时间上有良好的对应关系。14日09:00,位势不稳定区位于700~500 hPa,36.2°N以南(图5a)。10:00前后,位势不稳定到达冠县附近(图5b),比本地雷电发生时间提前超过1 h。11:00中低空急流继续向北推进,位势不稳定区也在向北发展(图5c,6c)。12:00位势不稳定区向北伸展至37.2°N附近(图5d),正好位于平原站上空,850 hPa为16 m·s⁻¹的东北风,700 hPa为22 m·s⁻¹的西南风,垂直风切变强,之后的1 h,13:00—14:00平原小时降雪量为7.6 mm。以上分析可见,位势不稳定的建立几乎同步于中低空700~500 hPa急流的北伸(图6),与700~500 hPa上20 m·s⁻¹风速前沿的向北推进在时间上具有高度的一致性,超前于最强降雪和雷电,提前量在1~2 h。

中低空700~500 hPa西南急流对位势不稳定形成起了重要作用。从假相当位温和温度平流的垂直变化(图7)可看出,伴随着700~500 hPa西南急

流增强,14日08:00—11:00中低层暖平流增强,假相当位温不断增大,不稳定能量被积累,以700~400 hPa增加最为显著。另外,从低层来看,10:00开始近地面附近的冷平流也趋于显著,与图4c中冠县站10:00—10:30之后地面温度的持续下降时段相吻合。11:00前,急流的推进使假相当位温随时间增大。11:00—13:00,600~300 hPa出现冷平流,暖平流层次有所降低,表现在600~500 hPa的暖平流被取代,但其下部600 hPa以下层次暖平流强度更强。此时,高层500 hPa冷平流叠置于低层925~600 hPa暖平流之上,700~500 hPa假相当位温随高度减小的特征更加显著,冷垫之上“上冷下暖”的不稳定层结不断被强化。因此11:00—13:00,冠县站小时降雪量均在4 mm以上,12:00—13:00小时降雪量达到5.5 mm。以冠县站为代表站,计算了14日08:00—14:00逐时850~400 hPa假相当位温随时间的变化(表1),进一步验证了降雪开始阶段(11:00之后)650~500 hPa假相当位温随高度减小的特征,与图5位势不稳定区域出现的高度相吻合。

从湿正压项MPV1沿116.5°E垂直剖面可以看到,14日11:00(图5e),MPV1沿着冷垫方向向北、向上爬升。14:00(图5f),MPV1正值区范围扩大,强度加强,35.5°~36.5°N上空800 hPa附近MPV1均为正值。MPV2与MPV1的分布走向类似,在700 hPa以下基本为负值。鲁西北上空出现了MPV1>0和MPV2<0的配置,表明鲁西北上空存在对称不稳定。低层对称不稳定的层次主要是在700 hPa以下,其高度低于位势不稳定层(图5)。因此,暖湿气流沿低层冷空气垫强迫爬升过程中,冷垫之上浅薄的层次内可发展出斜升气流。18:00后(图略)该区域对称不稳定强度显著减弱并逐渐消失。可见,本次暴雪对称不稳定与位势不稳定机制共存,即存在对流-对称不稳定机制,但二者位于不同层次上。对称不稳定位于700 hPa以下,当西南暖湿气流沿低层冷垫强迫爬升,在冷垫之上浅薄的层次内发展出斜升气流,而位势不稳定区是伴随700~500 hPa中低层西南气流向北推进建立的。当低层对称不稳定环境中暖湿空气沿锋面整层抬升后,倾斜对流发展,在700~500 hPa西南暖湿气流形成的位势不稳定区内继续发展,潜在不稳定转化为真实不稳定,能量进一步释放,在该区域发展出深厚强烈的垂直上升运动,引起带状强对流性暴雪。



注:图 a~d 左起第 1 条绿虚线为冠县所在位置,第 2 条为平原所在位置,下同;图 a~d 彩色填充为位势不稳定区;图 e~f 填充为 MPV1,等值线为 MPV2(单位:PVU)。

图 5 2023 年 12 月 14 日沿(a~d)700 hPa 低空急流和(e,f)116.5°E 不稳定的垂直剖面
Fig. 5 Cross-section of instability along (a~d) direction of 700 hPa low-level jet stream and (e, f) 116.5°E on 14 December 2023

3.3 不稳定的触发

除了冷空气楔入暖空气下,有西南暖湿气流在冷垫之上的动力强迫抬升外,通过形势分析发现,700 hPa 以上鲁西北地区处于高空西风槽前(图 2a)和低空西南急流的左前侧,均有利于上升运动的建立和发展。分析涡度、垂直速度等物理量的垂直廓线发现(图 8),900 hPa 以下为东北气流,800 hPa 以上转为西南风;温度层结来看,中层受西南暖湿气流

影响,气温高于低层,接近或略低于 0°C。14 日 10:00 前后,500 hPa 西南低空急流 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速前沿伴随位势不稳定区,在向东北方向发展刚刚到达冠县(图 5a~5d),冠县 800~500 hPa 存在较强垂直上升运动(图 8a₁),垂直运动的层次深厚,极大值出现在 500 hPa 附近,最大上升气流为 $-20 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,高架对流强烈垂直上升运动的发展还与 700~500 hPa 附近风速的增强和对流的触发等因素有关:在中层 700~500 hPa 风速增强后,

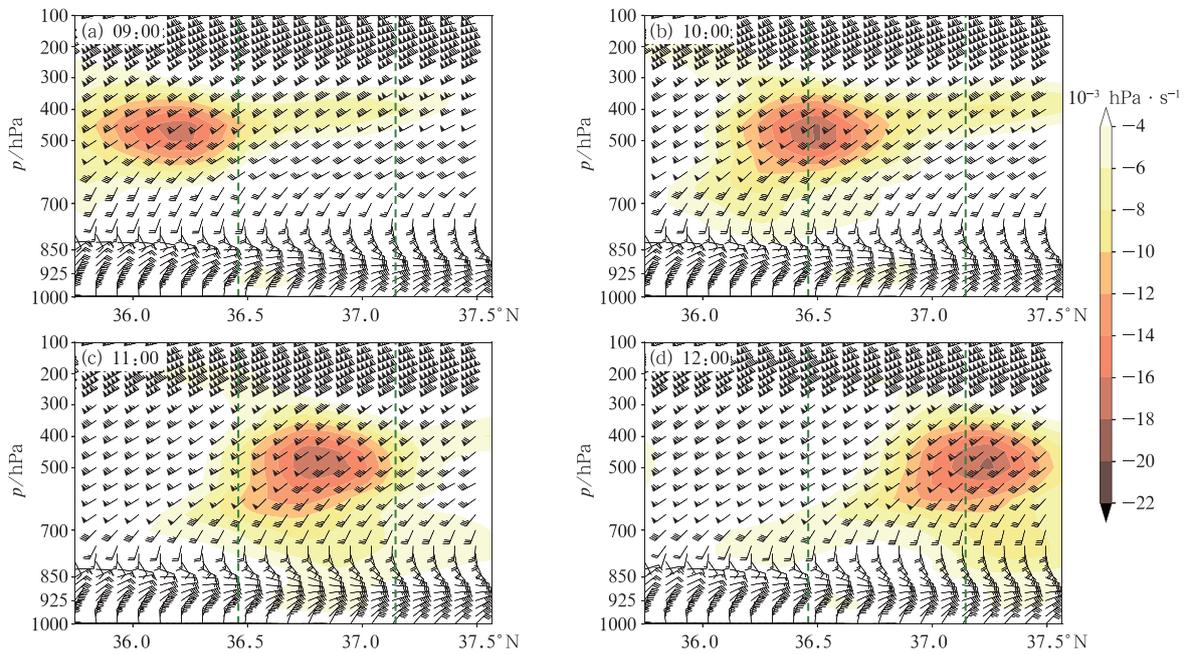


图 6 2023 年 12 月 14 日 09:00—12:00 经冠县站和平原站沿低空急流方向的垂直速度(填色)和风场(风羽)经向垂直剖面

Fig. 6 Meridional cross-section of vertical velocity (colored) and wind field (barb) along the low-level jet stream direction at Guanxian Station and Pingyuan Station from 09:00 BT to 12:00 BT 14 December 2023

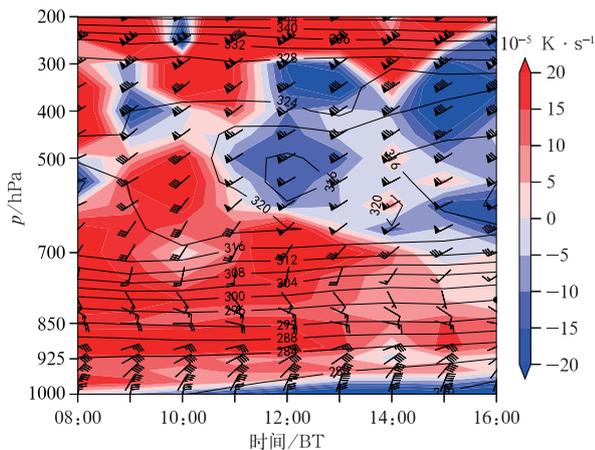


图 7 2023 年 12 月 14 日冠县站假相当位温(黑线,单位:K)、水平风场(风羽)和温度平流(填色)的时间演变

Fig. 7 Time-vertical profile of θ_{se} (black line, unit: K), horizontal wind field (barb) and temperature advection (colored) at Guanxian Station on 14 December 2023

槽前正涡度平流加强,根据准地转理论槽前正涡度平流随高度增加,且 700~500 hPa 为暖平流,造成垂直上升气流加强。从 700~500 hPa 风速的大小

来看,沿急流方向(图 6),南部风速大于北部,说明急流上有明显的风速辐合或脉动,也加强了中层的辐合和垂直上升运动。由于最大上升气流达到 $-20 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,表明过程中伴随了中小尺度系统的活动,当天气尺度系统东移和冷垫强迫抬升造成天气尺度上升运动之后,引发上升气流使中层条件不稳定增强,不稳定能量释放从而引发大气对流运动,造成上升运动显著增强。

比湿的分布呈现中间大、上下小的特点,中层比湿在 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。从散度场来看,中层 550 hPa 附近的辐合配合 450 hPa 以上层次的高层辐散,增强了垂直上升运动。低层辐合中心位于急流轴左侧,与 200 hPa 高空急流辐散区相叠加。随着时间演变,中层风速的大数值区自南向北推进(图 8),14 日 11:00 前后,冠县和平原之间的临清站上升运动极值较其前一时刻明显增强,由 $-10 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 增强到 $-17 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。10:00—12:00 低层特别是 700~500 hPa 风速有增强的趋势,从 10:00 的 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 12:00 的 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。12:00 中层强上升运动中心明显北移,11:00—16:00 自西南向东北,聊城、德州、济南等多地陆续出现闪电,与西南低空急流沿黄河一线向东北方向

表 1 2023 年 12 月 14 日冠县站各层假相当位温随时间的变化
Table 1 θ_{sc} on different barometric pressure layers at Guanxian Station on 14 December 2023

时间/BT	θ_{sc}/K					
	700 hPa	650 hPa	600 hPa	550 hPa	500 hPa	400 hPa
08:00	316.9	316.8	316.7	315.3	321.0	324.4
09:00	318.9	318.6	319.8	320.3	322.2	324.0
10:00	318.6	323.2	323.4	323.3	323.6	323.8
11:00	314.8	321.0	323.5	318.5	316.9	322.9
12:00	315.0	320.1	316.4	314.1	315.4	323.0
13:00	314.3	319.5	316.7	316.3	317.4	325.1
14:00	313.3	319.8	321.3	318.2	315.9	320.4

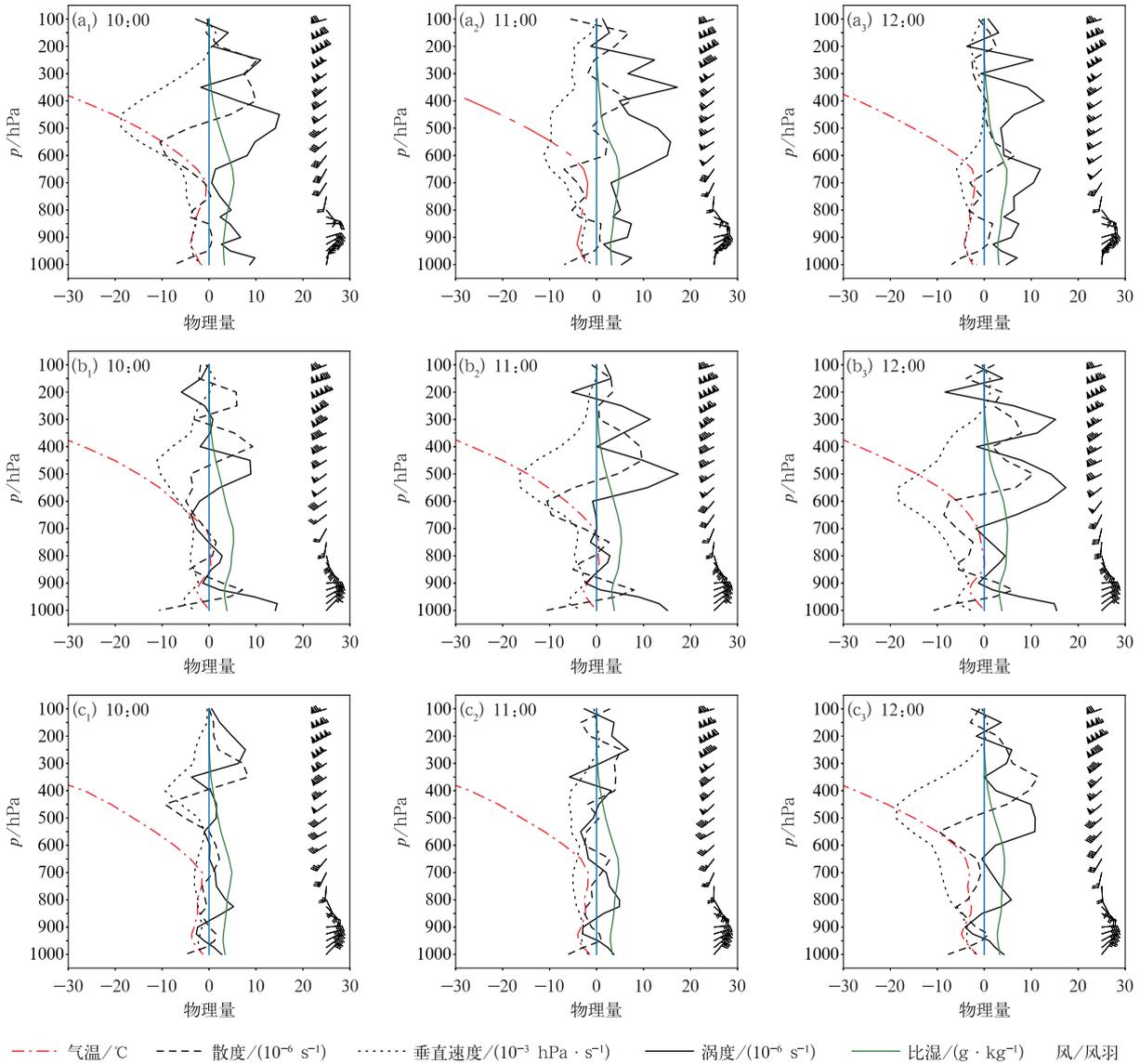


图 8 2023 年 12 月 14 日 10:00—12:00 沿低空急流方向(自西南向东北)站点物理量垂直廓线
(a)冠县站,(b)临清站,(c)平原站
Fig. 8 Vertical profiles of physical quantities at (a) Guanxian, (b) Linqing and (c) Pingyuan stations along the direction of low-level jet stream (from southwest to northeast) from 10:00 BT to 12:00 BT 14 December 2023

移动的时间一致,强烈的上升运动有利于水汽的凝结,与强降雪时段相对应。因此,高架对流上升运动

的发展与冷垫抬升、中层风速的增强和对流的触发有关,槽前上升气流的加强触发了位势不稳定能量

释放,有利于中小尺度系统发展,因此出现强降雪并监测到强烈、高频的雷电活动。为更好地理解此次物理过程,结合高架对流暴雪的触发与不稳定机制,给出概念模型(图 9)。

4 雷达回波特征

雷电是由积雨云中冰晶“温差起电”以及其他起电作用所造成的,雷暴中的雷电与对流活动呈正相关。从济南章丘站探空资料看,0、-10、-20、-30℃ 的高度分别为 0.4、5.1、6.3、7.5 km。雷电

发生时鲁西北地区最低云顶亮温在 -50℃ 左右,云顶高度最高为 9~10 km,系统发展高度较高。回波顶高大多在 6~8 km,最高为 10~11 km,超过了一 30℃ 层高度。降水回波向东北移动,以大范围的混合型回波为主,有东北—西南向排列的多个较弱的对流块和絮状单体回波,与急流推进对应较好,回波主要集中在 20~35 dBz,最强可达 45~50 dBz。

14 日 10:05 聊城雷达 0.5°仰角基本反射率因子垂直剖面(图 10a)可见,在鲁西北上空的大片层状云中,沿垂直于低空急流方向有较强对流单体发展(图 10a 对流单体 1~5),对流在逆温层上触发,

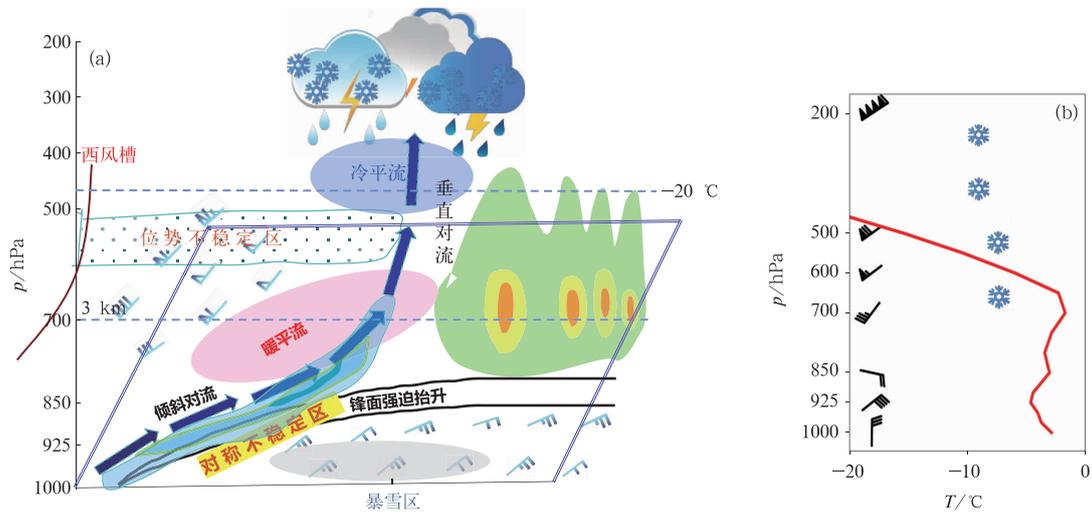
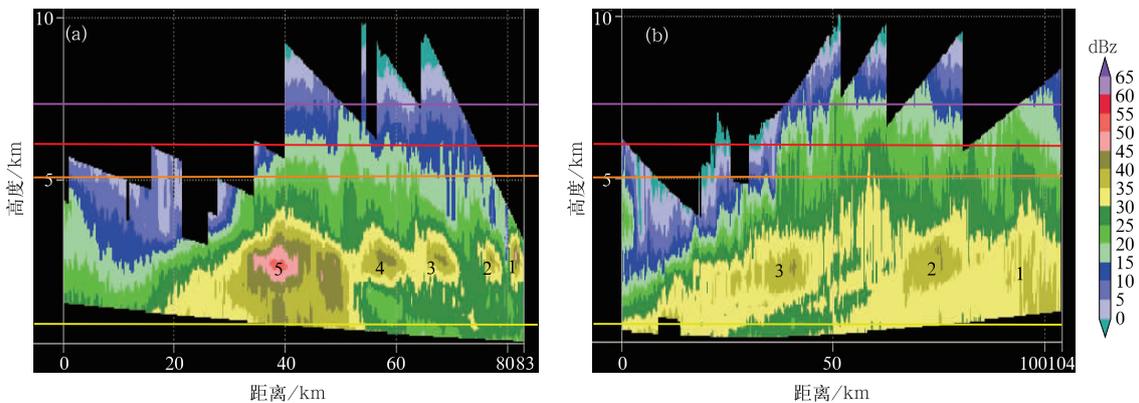


图 9 2023 年 12 月 14 日山东高架对流暴雪的(a)概念模型及(b)温度廓线

Fig. 9 (a) Conceptual model and (b) temperature profile for elevated convective blizzard in Shandong Province on 14 December 2023



注:黄色、橙色、红色、紫色实线分别为 0、-10、-20、-30℃ 层高度。

图 10 2023 年 12 月 14 日聊城 0.5°仰角雷达基本反射率因子的垂直剖面

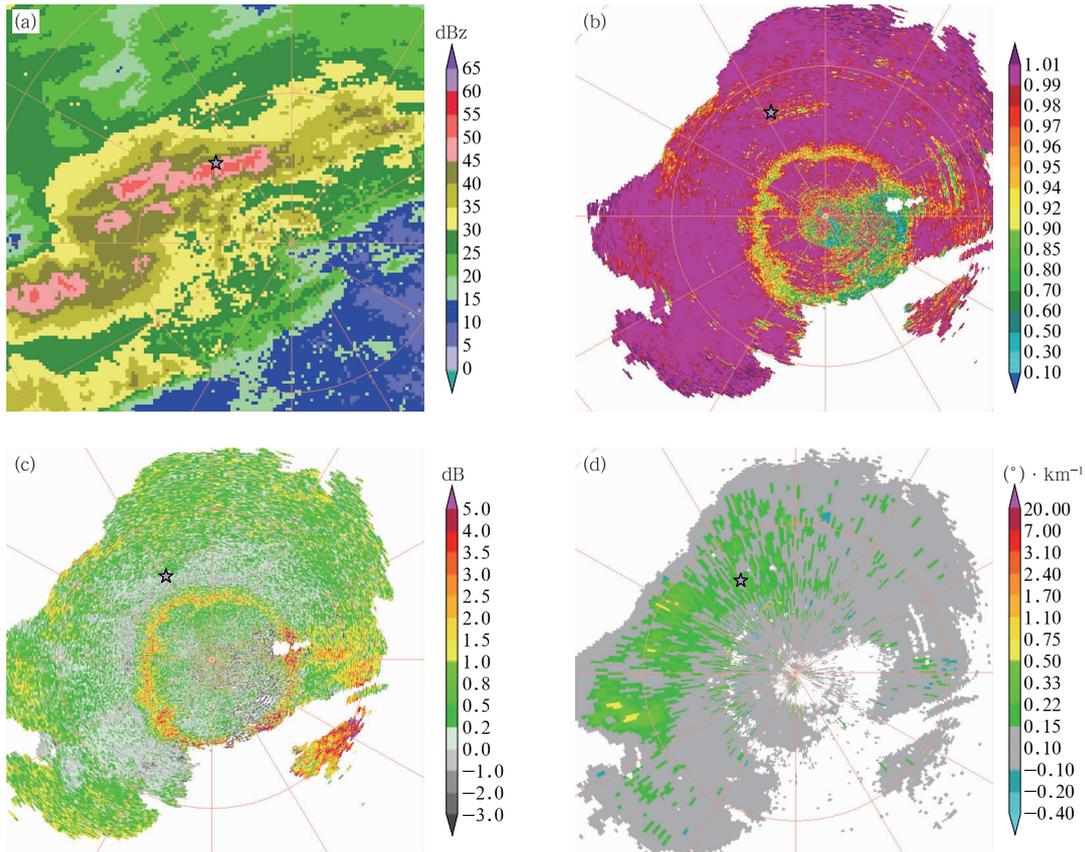
(a)10:05 沿雷达径向 290°, (b)11:37 沿低空急流方向

Fig. 10 Cross-section of basic reflectivity factor at 0.5° elevation of Liaocheng Radar along (a) the radar radial 290° at 10:05 BT and (b) the direction of low-level jet stream at 11:37 BT on 14 December 2023

旺盛区高度为 3~4 km。11:00—16:00 时段内出现“雷打雪”天气,降雪过程中,回波较之前减弱,11:37 对流单体 1~3(图 10b)弱于图 10a 中的对流单体 1~5,回波主要集中在 20~35 dBz,但 35 dBz 回波伸展高度达 -20~-10℃层,说明在此期间对应的云体中有较强上升气流,使其迅速增强、发展高度更高。尽管从雷达图上看,对流云降水特征不典型,但云顶高度很容易达到 -20~-10℃层高度,此高度大量过冷却水冻结成冰晶,容易导致温差起电,所以伴随降雪的出现,沿黄河的鲁西北、鲁中大部分地区都出现了雷电。

双偏振产品中,相关系数反映了粒子的均匀一致性,因此混合相态与纯雨和纯雪的相关系数(CC)有明显差异。差分反射率因子(Z_{DR})反映粒子水平和垂直尺寸的不同,回波强度有差异。图 8b 临清站

(位于聊城雷达径向 351°、36.7 km)的垂直廓线显示 850~700 hPa 温度略高于 0℃,代表该高度存在融化层。当存在中层融化层时,雪花或冰晶降落到 0℃层附近,表面发生融化可使雷达反射率突然增大,即 2.4°仰角之上的基本反射率因子产品通常可以看到有 0℃层亮带,也可以借助 Z_{DR} 环和 CC 环识别 0℃层亮带。14 日 10:05 聊城雷达回波(图 11a)主要集中在 20~35 dBz,最强可达 45~55 dBz。从 CC 分布(图 11b)可看出,2.4°以上仰角有低 CC 环,6.0°仰角距雷达中心 19 km 处(2.3 km 高度) CC 环非常清晰,其区域的相关系数为 0.80~0.92,CC 环之内和 CC 环之外相关系数均为 0.99~1.00,该差异是由于降水粒子相态的改变造成的。 Z_{DR} 产品上相同位置处也存在 Z_{DR} 环(图 11c), Z_{DR} 为 1.5~3.5 dB,最大可达 5 dB, Z_{DR} 环之内和之外均较小,即



注:☆为临清站位置。

图 11 2023 年 12 月 14 日 10:05 聊城双偏振雷达 6.0°仰角双偏振参量
(a)组合反射率因子,(b)相关系数,(c)差分反射率因子,(d)差分传播相移率

Fig. 11 (a) Composite reflectivity factor, (b) CC, (c) Z_{DR} and (d) K_{DP}
at 6.0° elevation of Liaocheng Dual-Polarization Radar

at 10:05 BT 14 December 2023

存在 0°C 层亮带。差分传播相移率(K_{DP})也有明显的近半圆状的增强区域(图11d),位于雷达的西—西北—北部。因此,该阶段降水仍以降雨为主。

10:26之后,聊城附近上空的 0°C 层亮带高度由2.3 km开始下降,CC环和 Z_{DR} 环不断收缩至消失,CC增大逐渐趋近于1,预示降水相态由雨向雪转变。降水回波14日10:30开始影响平原,反射率因子为20~30 dBz,最大40 dBz,CC为0.99~1.00,降水粒子均一性高,在粒子相态产品HCL上识别为干雪,已经完成了相态的转换(图略)。因此,强烈的雷暴活动发生在转雪之后的阶段。

5 结 论

利用常规观测资料、闪电定位监测、雷达资料和ERA5再分析资料等,分析了2023年12月14日山东地区的一次“雷打雪”天气过程,探讨了本次过程的成因和机制,得到以下结论:

(1)利用锋生函数、假相当位温的密集区和地面温度的变化特征相互印证,确定了雷暴和强降雪出现在地面冷锋的后部,低空有深厚稳定的冷垫,逆温层之上存强盛的暖湿空气,具有产生高架雷暴的环境。本次过程垂直风切变非常强, $0\sim 6\text{ km}$ 、 $0\sim 3\text{ km}$ 风矢量差分别为 $30.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $16.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大气有强的动力不稳定和斜压性,强垂直风切变和对流层中低层的暖湿气流,为冬季对流性天气的发生提供了动力和热力不稳定条件。

(2)结合本次暴雪的触发与不稳定机制,给出物理过程概念模型。暴雪期间,对称不稳定与位势不稳定同时存在,即存在对流-对称不稳定机制。对称不稳定和位势不稳定存在于不同层次上:对称不稳定主要位于700 hPa以下,当暖湿气流沿低层冷空气垫强迫爬升过程中,在冷垫之上浅薄的层次内发展出斜升气流,而随着700~500 hPa中低层西南气流的推进建立了位势不稳定。当低层对称不稳定导致的倾斜对流发展到700 hPa以上层次之后,位势不稳定能量得以释放,发展出深厚强烈的垂直上升运动。低层对称不稳定的能量释放形成带状降水,继续沿锋面上升,在对流层中层具有位势不稳定环境中继续发展,引起带状强对流性暴雪。位势不稳定的建立与700~500 hPa上 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速前沿的向北推进在时间上具有高度的一致性,超前于最强降雪和雷电,提前1~2 h。

(3)高架雷暴的触发除了与低层冷垫动力抬升

有关之外,还与700~500 hPa附近风速的增强有关:在中层700~500 hPa风速增强后,槽前正涡度平流加强,进而造成上升气流加强,强上升气流触发对流活动,造成强降雪和强烈、高频的雷电活动。尽管本次高架雷暴强降雪时段的反射率因子主要集中在20~35 dBz,但回波顶高超过了一 30°C 层高度,35 dBz的回波伸展到达一 10°C 层高度之上,因此仍需高度关注冬季雷电的发生。双偏振产品中 Z_{DR} 环和CC环对转雪时间有较好的指示意义。

参考文献

- 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]. J Meteor Sci, 38(5):681-691(in Chinese).
- 齐道日娜,何立富,张乐英,2024.“21·11”极端暴雪过程多系统结构演变及热动力机制[J].气象,50(1):18-32. Chyi D, He L F, Zhang L Y, 2024. Multi-system structure evolution and thermodynamic mechanism of the extreme snowstorm during 6—8 November 2021[J]. Meteor Mon, 50(1):18-32(in Chinese).
- 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]. Meteor Environ Sci, 42(4):63-73(in Chinese).
- 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).
- 丁栋生,李树林,1993.一次“雷打雪”天气过程的初步分析[J].气象,19(10):52-53. Ding D S, Li S L, 1993. A preliminary analysis of a “thunderstorm” weather process[J]. Meteor Mon, 19(10):52-53(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 45(10):1363-1374(in Chinese).
- 费建芳,伍荣生,宋金杰,等,2009.对称不稳定理论的天气分析与预报应用研究进展[J].南京大学学报(自然科学版),45(3):323-333. Fei J F, Wu R S, Song J J, et al. 2009. Advances in synoptic analysis and application of symmetric instability theory[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 45(3):323-333(in Chinese).
- 冯丽莎,宋攀,郑飞,等,2020.2016年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J].大气科学,44(1):13-26. Feng L S, Song P, Zheng F, et al. 2020. Diagnostic analysis of a severe regional snowstorm event in the early winter of 2016 in Henan Province, China[J]. Chin J Atmos Sci, 44(1):13-26(in Chinese).

- 胡玲,刘锦,东高红,等,2020.天津城区暴雪的环流形势与雷达特征分析[J].气象与环境科学,43(1):34-42. Hu L, Liu J, Dong G H, et al, 2020. Analysis on the circulation situation and radar characteristics of snowstorm in Tianjin City[J]. Meteor Environ Sci, 43(1): 34-42(in Chinese).
- 胡顺起,曹张弛,陈滔,2017.山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J].高原气象,36(4):984-992. Hu S Q, Cao Z C, Chen T, 2017. Diagnostic analysis of a historical extreme snow process in south of Shandong Province[J]. Plateau Meteor, 36(4): 984-992 (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. Li B, Wang W, Liu F, et al, 2023. Causes of an extremely precipitation and gale in Shandong Province in early winter[J]. Desert Oasis Meteor, 17(4): 30-37(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).
- 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]. Meteor Mon, 44(2): 258-267 (in Chinese).
- 马曼曼,2021.我国冬季雷暴的时空分布特征与环流背景分析[D].长沙:国防科技大学. Ma M M, 2021. Analysis of the winter cloud-to-ground lightning activity and its synoptic background in China[D]. Changsha: National University of Defense Technology (in Chinese).
- 衣孟松,赖珍权,梁俊聪,等,2013.2012年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析[J].气象,39(7):874-882. Nong M S, Lai Z Q, Liang J C, et al, 2013. Analysis on elevated thunderstorm hail in Guangxi in early spring of 2012[J]. Meteor Mon, 39(7): 874-882(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).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社:23-25. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Techniques of Severe Convective Weather Forecasting: Handbook of Severe Convective Weather Forecasting in China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 23-25(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).
- 王仁乔,宋清翠,1990.“雷打雪”现象发生机制初探[J].气象,16(3):45-47. Wang R Q, Song Q C, 1990. A preliminary study on the mechanism of the phenomenon of “thunderstorm”[J]. Meteor Mon, 16(3): 45-47(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 basal issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4): 389-399(in Chinese).
- 王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2014.副高外围对流雨带中的对流-对称不稳定及锋生的诊断分析[J].大气科学,38(1):133-145. Wang Z M, Ding Y H, Zhang Y X, et al, 2014. Analysis of convective-symmetric instabilities and frontogenesis in a convective rain band on the northwest edge of WPSH[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 133-145(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).
- 阎丽凤,杨成芳,2014.山东省灾害性天气预报技术手册[M].北京:气象出版社:223-227. Yan L F, Yang C F, 2014. Technical Manual of Disastrous Weather Forecast in Shandong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 223-227(in Chinese).
- 杨成芳,姜鹏,张少林,等,2013.山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J].气象,39(3):355-361. Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al, 2013. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong[J]. Meteor Mon, 39(3): 355-361 (in Chinese).
- 尤红,肖子牛,曹中和,等,2010.“2.28”云南罕见春季强对流雷达回波特征分析与数值模拟[J].高原气象,29(5):1270-1279. You H, Xiao Z N, Cao Z H, et al, 2010. Characteristic analysis on radar echo and numerical simulation of spring severe convection in Yunnan on 28 February 2008[J]. Plateau Meteor, 29(5): 1270-1279(in Chinese).
- 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. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Now-casting of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press(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).
- 翟亮, 郭淳薇, 马新成, 等, 2018. 北京 2016 年“11. 20”初雪预报偏差分析[J]. *气象*, 44(1): 151-158. Zhai L, Guo C W, Ma X C, et al, 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 november 2016[J]. *Meteor Mon*, 44(1): 151-158(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 Meteor Sin*, 76(5): 824-832(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).
- 郑丽娜, 张子涵, 夏金鼎, 2019. 山东省“雷打雪”事件分型及其成因分析[J]. *气象*, 45(8): 1075-1084. Zheng L N, Zhang Z H, Xia J D, 2019. Classification and cause analysis of “thundersnow” event in Shandong[J]. *Meteor Mon*, 45(8): 1075-1084(in Chinese).
- 周芳, 王晓东, 毛连海, 2021. 一次高空急流背景下江西暴雪过程分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 15(1): 36-45. Zhou F, Wang X D, Mao L H, 2021. Analysis of a snowstorm influenced by upper troposphere jet stream in Jiangxi Province[J]. *Desert Oasis Meteor*, 15(1): 36-45(in Chinese).
- 周雪松, 杨成芳, 孙兴池, 2013. 两次早春暴雪过程的对比分析[J]. *高原气象*, 32(2): 2446-2455. Zhou X S, Yang C F, Sun X C, 2013. Comparative analyses on two early spring snowstorm processes [J]. *Plateau Meteor*, 32(2): 2446-2455(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. Principle of Synoptic Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press (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 surface in environments without positive CAPE. Part II: organization and instability mechanisms [J]. *Mon Wea Rev*, 118(5): 1123-1144.
- Holle R L, Cortinas J V Jr, Robbins C C, 1998. Winter thunder storms in the United States [C] // Proceedings of the 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting. Phoenix: Amer Meteor Soc: 298-300.
- Maesaka T, Uyeda H, Shinoda T, et al, 2003. Detection of graupel in winter thunderclouds using a dual polarization radar in Hokuriku, Japan [C] // Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Boston: American Meteorological Society: 53.
- Means L L, 1952. On thunderstorm forecasting in the central United States [J]. *Mon Wea Rev*, 80(10): 165-189.
- Trapp R J, Schultz D M, Ryzhkov A V, et al, 2001. Multiscale structure and evolution of an Oklahoma winter precipitation event [J]. *Mon Wea Rev*, 129(3): 486-501.

(本文责编: 侯翠梅)