暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

华北初春一次高架雷暴天气的环境条件及触发机制分析

王鹤婷 刘小雪 王清川 李娜 周涛 刘淇淇 张湘涵 许敏

Analysis of environmental conditions and trigger mechanism of an elevated thunderstorm in early spring in North China

WANG Heting，LIU Xiaoxue，WANG Qingchuan，LI Na，ZHOU Tao，LIU Qiqi，ZHANG Xianghan，XU Min

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-084

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

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

一次深秋高架雷暴天气的对流特征与发展机制分析

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

暴雨灾害. 2025, 44(2): 197-206 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-035

对流风暴大气不稳定机制研究的若干问题

Some issues in studies on the atmospheric instability of convective storms

暴雨灾害. 2024, 43(3): 266-275 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-030

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

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

贺兰山东麓两次局地暴雨过程的湿位涡诊断分析

Diagnostic analysis of moist potential vorticity for two local rainstorm events on the eastern foot of Helan Mountain

暴雨灾害. 2020, 39(2): 148-157 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王鹤婷,刘小雪,王清川,等.2025.华北初春一次高架雷暴天气的环境条件及触发机制分析[J].暴雨灾害,44(3):361−370. WANG Heting, LIU Xiaoxue, WANG Qingchuan, et al. 2025. Analysis of environmental conditions and trigger mechanism of an elevated thunderstorm in early spring in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):361−370 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−084

华北初春一次高架雷暴天气的环境条件及触发机制分析

王鹤婷, 刘小雪, 王清川, 李娜, 周涛, 刘淇淇, 张湘涵, 许敏
(河北省廊坊市气象局, 廊坊 065000)

摘　要: 2018 年 4 月 4 日, 华北发生一次暴雪伴随高架雷暴的天气过程, 利用国家和区域气象站、探空、闪电定位观测和 ERA5 再分析资料, 采用天气诊断和绝对地转动量距平调整 (Δ*M* 调整) 等方法探讨了此次天气过程的天气形势、环境条件和雷暴触发机制。结果表明: (1) 此次天气过程发生在冷锋过境后的北侧冷区内, 是一次在华北冷季回流形势下伴随暴雪发生的高架雷暴过程。(2) 该过程为东路冷空气遇太行山阻挡后形成干冷垫, 导致强逆温层的出现, 减弱了拖曳作用, 从而有利于对流活动的发展。同时, 对流层中层的水汽水平输送为高架雷暴提供了必要的水汽和能量支持。(3) 湿位涡分析表明, 高架雷暴发生在逆温层上方对流稳定但对称不稳定的区域内, 有利于倾斜上升气流发展。(4) 本次高架雷暴的触发机制与 Δ*M* 调整密切相关。地面辐合线、地形等因素引起初始上升运动, 尽管中性层结抑制上升运动, 但上升气流在 Δ*M* 调整下进入对称不稳定区域, 释放能量, 激发持续的倾斜上升气流, 扩展到 200 hPa 高度, 形成初春高架雷暴。

关键词: 高架雷暴; 倾斜上升气流; 湿位涡; 对称不稳定; Δ*M* 调整
中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−084

Analysis of environmental conditions and trigger mechanism of an elevated thunderstorm in early spring in North China

WANG Heting, LIU Xiaoxue, WANG Qingchuan, LI Na, ZHOU Tao, LIU Qiqi, ZHANG Xianghan, XU Min

(*Langfang Meteorological Bureau of HeBei Province*, *Langfang* 065000)

Abstract: On April 4, 2018, a snowstorm accompanied by elevated thunderstorms occurred in North China. Using observation data from national and regional meteorological stations, sounding, lightning location, as well as ERA5 reanalysis data, weather diagnosis, and absolute momentum anomaly adjustment (Δ*M* adjustment) methods were employed to investigate the weather situation, the environmental conditions and thunderstorm-triggering mechanisms of this weather event. The results are as follows. (1) This weather event occurred within the cold sector to the north of a passing cold front, representing an elevated thunderstorm event accompanied by a snowstorm under the influence of a return flow pattern during the cold season in North China. (2) This event was the formation of a dry and cold air mass after eastern-route cold air encountered the blockage of the Taihang Mountains, leading to the emergence of a strong inversion layer that weakened the drag effect and thereby favored the development of convective activities. Meanwhile, horizontal water vapor transport in the middle troposphere provided necessary water vapor and energy support for the elevated thunderstorm. (3) Wet potential vorticity analysis indicated that the elevated thunderstorm occurred within a region of convective stability but symmetrical instability above the inversion layer, which was conducive to the development of tilted upward air currents. (4) The triggering mechanism of this elevated thunderstorm is closely related to the Δ*M* adjustment. Factors such as surface convergence lines and terrain induced initial upward motion. Although the neutral stratification suppressed upward motion, the upward air currents entered the region of symmetrical instability under the Δ*M* adjustment, releasing energy and triggering sustained tilted upward air currents that extended to an altitude of 200 hPa, forming an elevated thunderstorm in early spring.

收稿日期: 2024−05−06; **定稿日期**: 2024−11−11
资助项目: 廊坊市气象局项目 (202304, 202302, 202309); 河北省气象局青年基金项目 (22ky24); 华北区域气象科技创项目 (HBXM202409); 廊坊市科技局项目 (2024013060)
第一作者: 王鹤婷, 主要从事灾害天气临近预警技术研究。E-mail: 623349668@qq.com
通信作者: 许敏, 主要从事灾害天气临近预警技术研究。E-mail: Hblfxm@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Key words: elevated thunderstorm; tilted upward air currents; wet potential vorticity; symmetric instability; Δ*M* adjustment

引　言

高架雷暴是一种特殊类型的雷暴，其特点是在大气边界层以上触发，与传统雷暴不同 (Goyal et al., 2017;Suparta 等, 2017)，其暖湿气流并非从地面附近开始抬升，而是从逆温层顶部开始上升 (刘洲洋等, 2018)。这种雷暴可能引发严重的灾害性天气，包括冰雹、强风甚至龙卷风 (Corfidi et al., 2008; Horgan et al., 2007; Reif and Bluestein, 2017)。此外，高架雷暴还会导致“雷打雪”现象的发生 (Hunter et al., 2001)。由于其独特的形成机制和触发条件 (Patrick et al., 2019)，高架雷暴的分析对于提高冷季对流预报的准确性及防灾减灾具有重要意义 (Ma et al., 2024) 。

国内外学者对高架雷暴的特征及形成和触发机制进行了广泛的研究，不仅揭示了高架雷暴的基本特征，还探讨了其与锋生、高低空急流耦合、低空切变线、高空槽线等天气背景之间的关联。Kastman 等 (2017) 发现与地面雷暴相比，高架雷暴的特征是闪电活动增加和正地闪 (Cloud-to-Ground) 的比例更高。Moore 等 (2003) 发现，锋面系统有助于形成高架对流的形成。Trier 等 (2017) 发现，夜间稳定层结和冷池等环境条件有利于高架对流的发展。在我国南方地区，高架雷暴的发展得益于中层充沛的水汽、中高层温度差异、热力不稳定性、低空切变线以及 700 hPa 西南急流与 500 hPa 高空槽的配合 (盛杰等, 2014)。湖北地区冷季的高架雷暴常沿锋面逆温层之上的 850 hPa 附近触发并上升，地面至 925 hPa 的冷垫推动暖湿气流上升，在 925 hPa 逆温层附近引发高架雷暴，冷垫上方的西南暖湿气流强度越大，对流活动越强烈 (苟阿宁等, 2024))。以上这些研究多采用天气分析的方法，从天气尺度影响系统的角度剖析高架雷暴的特征及机制。

从中尺度的角度来看，近年研究表明，锋面促使暖湿气流爬升至条件性对称不稳定区域，大气的加速倾斜上升气流被视为高架雷暴的关键触发因素 (郭大梅等, 2018)。此外，在高架雷暴发生过程中，环境大气还存在对称不稳定现象 (王宁等, 2023)。这些研究不仅探讨了倾斜上升气流与对称不稳定之间的紧密关联，还强调了它们在高架雷暴天气系统中的关键性作用，倾斜上升气流在高架雷暴形成机制中所扮演的角色受到越来越多的重视 (俞小鼎等, 2016)。在研究对称不稳定大气环境中倾斜上升气流产生的机理时，Morcrette 和 Browning (2006) 通过数值模拟试验揭示了绝对地转动量距平调整 (Δ*M* 调整) 和条件性对称不稳定是形成倾斜上升气流的两个相互作用的机制。郑永光等 (2024) 指出,条件对称不稳定发生在强斜压区的附近，是锋面附近暴雨和强对流发展的重要物理机制。吴雪剑等 (2014) 在分析一次暴雨过程中的对称不稳定形成机制时发现，Δ*M* 调整可能是条件性对称不稳定形成的一个关键机制。黄小刚等 (2017) 在研究长江中下游地区的高架雷暴活动时指出，Δ*M* 调整与对称不稳定的共同作用导致了倾斜上升气流的产生。目前，我国对高架雷暴过程中倾斜气流的产生机理以及倾斜上升气流与对称不稳定相互作用机制的研究相对较少，因此深入分析这些机制将有助于深化对高架雷暴抬升触发机理的理解。

与 1951—2018 年 4 月华北地区降雪出现时间、降雪量、积雪深度相比，2018 年 4 月 4 日的华北暴雪过程属于一次极端降雪事件。杜佳 (2019) 对这一极端天气事件的特征及其形成机制进行了初步研究，但仅采用一般天气分析的方法对常规天气系统进行分析。为了深入理解高架雷暴在中性层结条件下的形成和触发机制，本文首先分析了此次高架雷暴事件的环流形势和环境条件。在此基础上，分析了气块产生初始上升运动即倾斜上升气流的触发机制，并深入探讨了在中性层结受抑制的情况下，倾斜上升气流如何在 Δ*M* 调整机制的作用下，沿着等熵面继续倾斜向上发展，从而激发对称不稳定能量的释放，最终导致高架雷暴形成的机制。通过本文研究以期提升对华北伴随高架雷暴的暴雪天气机理的认识，提高对此类天气预报预警能力。

1　研究区域与资料介绍

1.1　研究区域

华北地区 (图 1) 涵盖北京、天津、河北、山西以及内蒙古自治区。该区域西邻黄土高原和太行山脉，北接蒙古高原及燕山，而南部和东部地形较为平坦，形成了辽阔的华北平原。冷季时，特殊地形致偏东气流迂回华北，于太行山前平原堆积，形成“回流型”降雪 (田秀霞等, 2016)。此外，东临渤海使该区春季易受海洋暖湿气流影响，空气湿润，降水丰沛。

1.2　资料说明

本文使用的资料时间段为 2018 年 4 月 4 日—2018 年 4 月 5 日，包括：(1) 华北地区高空与地面加密自动观测数据，用于分析天气实况和环流背景。(2) 河北张家口和北京大兴探空站资料，用于分析逆温层结以及大气层结状况。以上两种资料均来源于

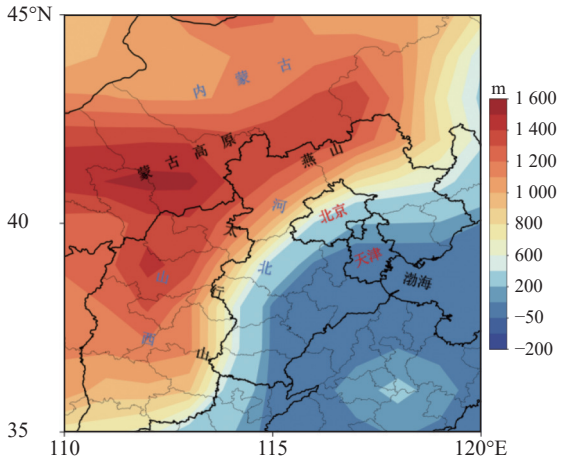


图 1 华北行政区划及地形 (色斑) 图

Fig. 1 Topographic (shaded) map of North China

中国气象局大数据云平台。(3) 河北省闪电定位资料, 用于识别雷电落区 (河北省气象共享平台提供的全省地面闪电监测数据)。在气象业务和科研中, 闪电定位数据 (如地闪密度、总闪频数) 常作为雷暴强度的替代指标。例如: 美国国家气象局 (NWS) 将闪电频数突变作为强雷暴预警的辅助判据 (Koshak et al., 2021); 中国气象局 2014 年正式取消了雷暴日人工观测业务, 闪电定位技术快速发展使人工观测逐渐被闪电定位仪监测所替代 (曾庆峰等, 2018)。(4) 欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的第五代再分析资料 (ERA5), 水平分辨率 0.25°×0.25°, 时间间隔 1 h, 用于气象要素分析和物理量诊断。

2 研究方法

2.1 湿位涡诊断

本文采用湿位涡 (ζ_{MPV}) 作为稳定性条件的判据。湿位涡综合反映大气动力、热力特征, 与暴雨 (雪) 形成的基本条件高度契合 (黄晓璐等, 2020)。湿位涡的单位为 PVU, 1 PV=$10^{-6}\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}\cdot kg^{-1}$。当大气出现对称不稳定时, 湿位涡斜压项为负, 揭示了不稳定能量积累与释放机制。P 坐标系下湿位涡表达式为

$$\begin{aligned}\zeta_{MPV} &= \zeta_{MPV1}+\zeta_{MPV2}\\ &= -g(\zeta+f)\frac{\partial\theta_e}{\partial p}+\left(g\frac{\partial v\partial\theta_e}{\partial p\partial x}-g\frac{\partial u\partial\theta_e}{\partial p\partial y}\right)\end{aligned} \quad (1)$$

其中, ζ 为垂直涡度, f 为科氏参数, θ_e 为相当位温。在日常业务中, ζ_{MPV} 常常被写成分量形式, 拆分为 ζ_{MPV1} 和 ζ_{MPV2}, ζ_{MPV1} 为湿正压项, 表征对流稳定性, 大于零代表大气为对流稳定, 反之代表大气对流不稳定。ζ_{MPV2} 为湿斜压项, 表示湿斜压性和水平风垂直切变的贡献。当 $\zeta_{MPV1}>0$, $\zeta_{MPV2}<0$ 时, 大尺度大气层结处于对流稳定状态, 但在中尺度上有斜升气流时, 会产生对称不稳定能量, 负值越大对称不稳定越强, 大气的斜压性也越大。下文用 MPV1 代表 ζ_{MPV1}、MPV2 代表 ζ_{MPV2}。

2.2 绝对地转动量距平调整

绝对地转动量距平 (ΔM) 是大气动力学中的重要概念, 定义为气块与环境大气的绝对地转动量差值。在层结稳定的斜压大气中, 低层气块受热浮力作用上升时, 因绝对地转动量守恒, 其值保持不变。当气块重力与浮力达到平衡时, 低层绝对地转动量与环境大气的差值持续存在, 进而产生沿等熵面的惯性加速度。该机制推动气块倾斜爬升, 对高架雷暴的形成与维持具有关键作用 (黄小刚等, 2017)。

本文用实际风替代地转风, 用绝对动量代替绝对地转动量, 其中绝对动量 M 计算公式为 (彭霞云等, 2025)

$$M=v+fx \quad (2)$$

式中 M 表征流体微元绕地球自转轴的绝对角动量在自转轴方向的分量(标量), v 为垂直于剖面的风分量(标量), f 为科氏参数, x 为剖面各点与原点的距离。

3 天气概况与环流形势

3.1 天气概况

2018 年 4 月 4 日, 华北中部地区发生雨雪天气。河北北部以纯雪为主, 中部由雨转雪, 南部主要为雨。张家口、北京西部及保定北部达暴雪量级, 最大降雪量 21.7 mm, 最大雪深 12 cm (图 2a)。雷暴主要集中在 12:40 (北京时, 下同)—14:35, 影响范围包括张家口南部、大同市东部以及北京西部, 这些区域与 4—5 日 24 h 累积暴雪区域重叠。降雪高峰为 14:00—15:00, 张家口阳原 1 h 降雪量达7.1 mm。

3.2 环流形势

2018 年 4 月 4 日 08:00 高空 500 hPa 的天气图 (图 3b) 中, 中高纬度呈两槽一脊的环流形势, 华北受平直的西风环流控制。700 hPa 图 (图 3c) 中, 暴雪落区处于槽前强盛的西南急流中, 最大风速 16 $m\cdot s^{-1}$。850 hPa 图 (图 3d) 上, 内蒙古中东部和冀北有冷高压活动, 高压前部冷空气经东北、渤海回流影响华北地区。风向与等温线近垂直, 风速 12 $m\cdot s^{-1}$, 冷平流强盛, 形成了楔形的冷垫。地面图上 (图 3a), 冷锋主体已南下至华南地区, 距离降雪区超过 150 km。冷高压中心位于内蒙古与辽宁交界处。华北地区处于高压中心的西南象限, 等高线较为密集。高压东部的冷空气经渤海回流影响华北地区。700 hPa 西南暖湿

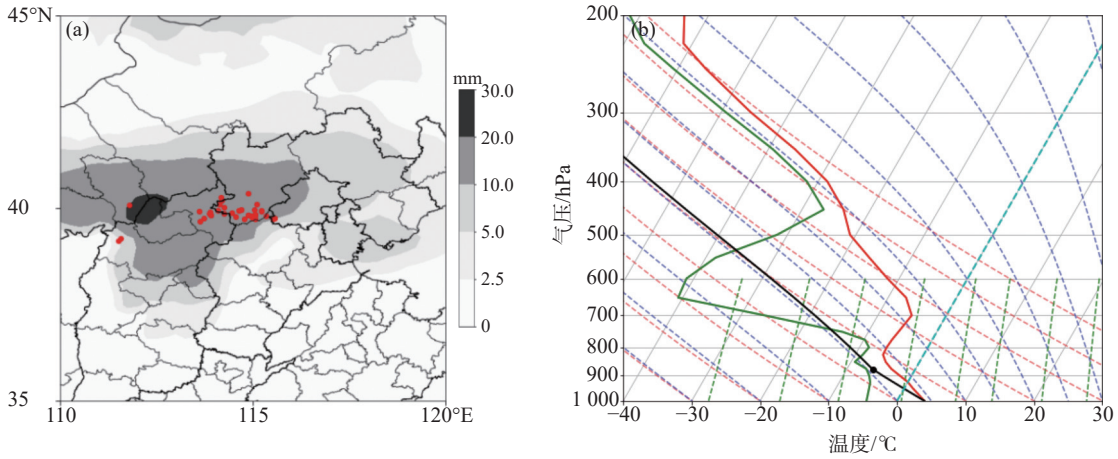


图 2 2018 年 4 月 4 日 08:00—5 日 08:00 降水量 (灰色色斑) 和闪电落区 (红色圆点) 分布图 (a)、2018 年 4 月 4 日 08:00 张家口站 ERA5 再分析探空图 (b)

Fig. 2 Distribution map of the (a) precipitation (gray spot) and lightning location (red dots) from 08:00 BT on April 4 to 08:00 BT on April 5, 2018, (b) the ERA5 reanalysis sounding map at Zhangjiakou station at 08:00 BT on April 4, 2018

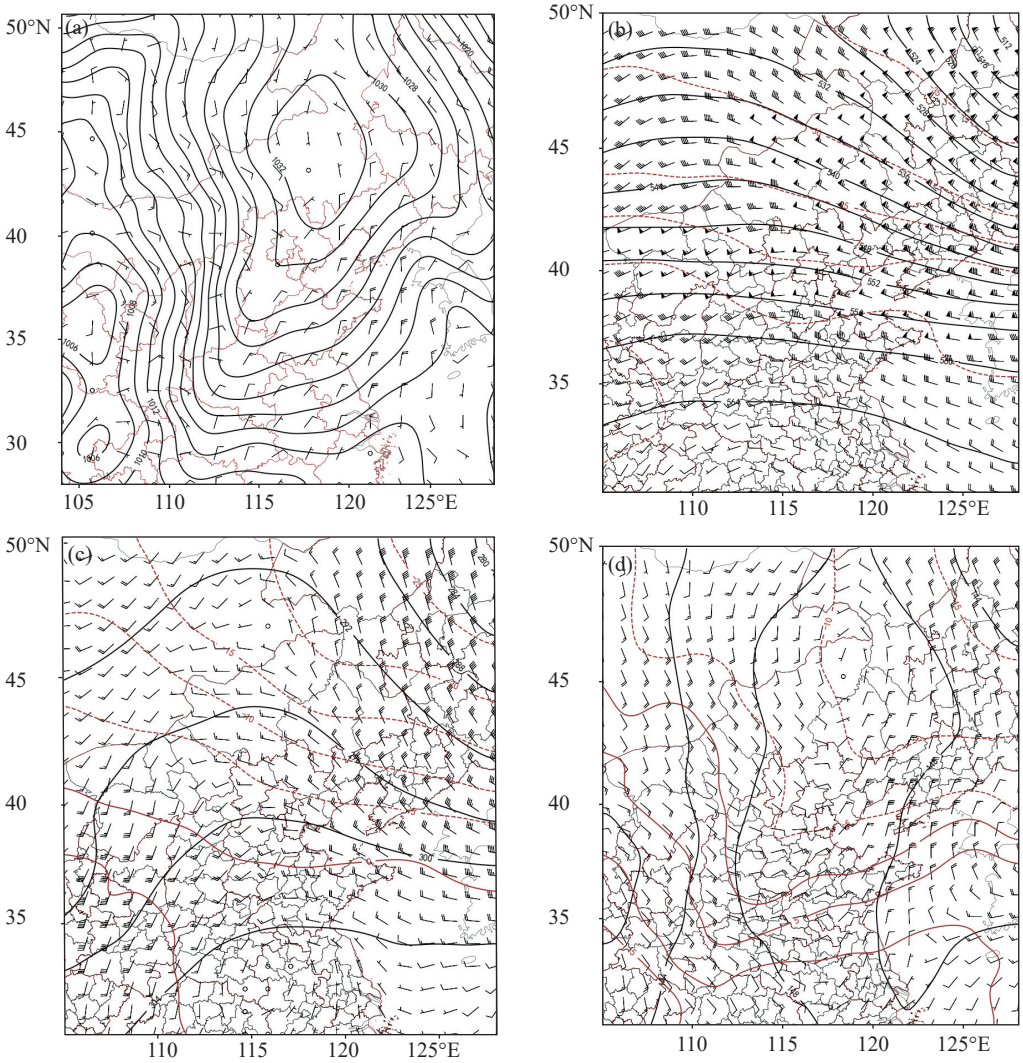


图 3 2018 年 4 月 4 日 08:00 海平面气压 (黑色线条, 单位:hPa) 及与风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 合成图 (a)、500 hPa (b)、700 hPa (c)、850 hPa (d) 位势高度 (黑色线条, 单位: dagpm)、等温线 (棕色线条, 单位: ℃) 及风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 合成图

Fig. 3 Composite maps of sea-level pressure (black contours, unit: hPa) and wind fields (wind barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$) (a), and composite maps of geopotential height (black contours, unit: dagpm), isotherms (brown contours, unit: °C), and wind fields (wind barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 500 hPa (b), 700 hPa (c), and 850 hPa (d) at 08:00 BT on April 4, 2018

气流在低层冷垫上爬升, 构成了典型的华北回流形势, 为华北地区暴雪和对流的形成提供了有利条件。本次过程发生时冷锋已过境, 张家口探空图 (图 2b) 显示 700 hPa 层为−3 ℃, 761 hPa 层为−9 ℃, 有明显逆温层。二维闪电分布图 (图 2a) 显示有多个站点同时出现雷暴现象, 同时还有降雪发生, 符合盛杰等 (2014) 结合我国的气候特点对高架雷暴的定义。

4 环境条件

4.1 风场及温湿条件

4 月 4 日 08:00, 张家口地区的风场垂直分布图 (图 4) 显示, 700 hPa 西南气流占主导地位; 850 hPa 以下风向逐渐转变为东南风; 925 hPa 以下风向转变为东北风。这种风向的转变, 不仅体现了回流冷空气的独特性质, 还直接影响了水汽的输送。而中低层充足的水汽对于高架雷暴的孕育、形成及其后续发展具有至关重要的影响 (盛杰等, 2014)。本次过程比湿的垂直分层特征及演变 (图 5) 对降雪增强、雷

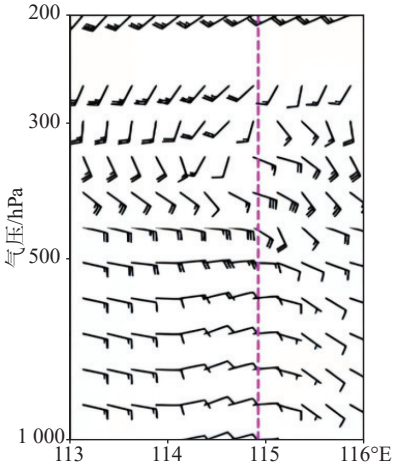


图 4 2018 年 4 月 4 日 08:00 沿 40°N 经张家口站风场 (风向杆, 单位:m·s^{-1}) 经度-高度剖面图 (紫色虚线代表同时观测到暴雪和雷暴的张家口站)

Fig. 4 Longitude-high cross-section diagram of the wind field (wind barbs, unit: m·s^{-1}) along 40°N at 08:00 BT on April 4, 2018 (The purple dashed line represents the 115°E longitude, indicating Zhangjiakou station where heavy snow and thunderstorms were observed simultaneously)

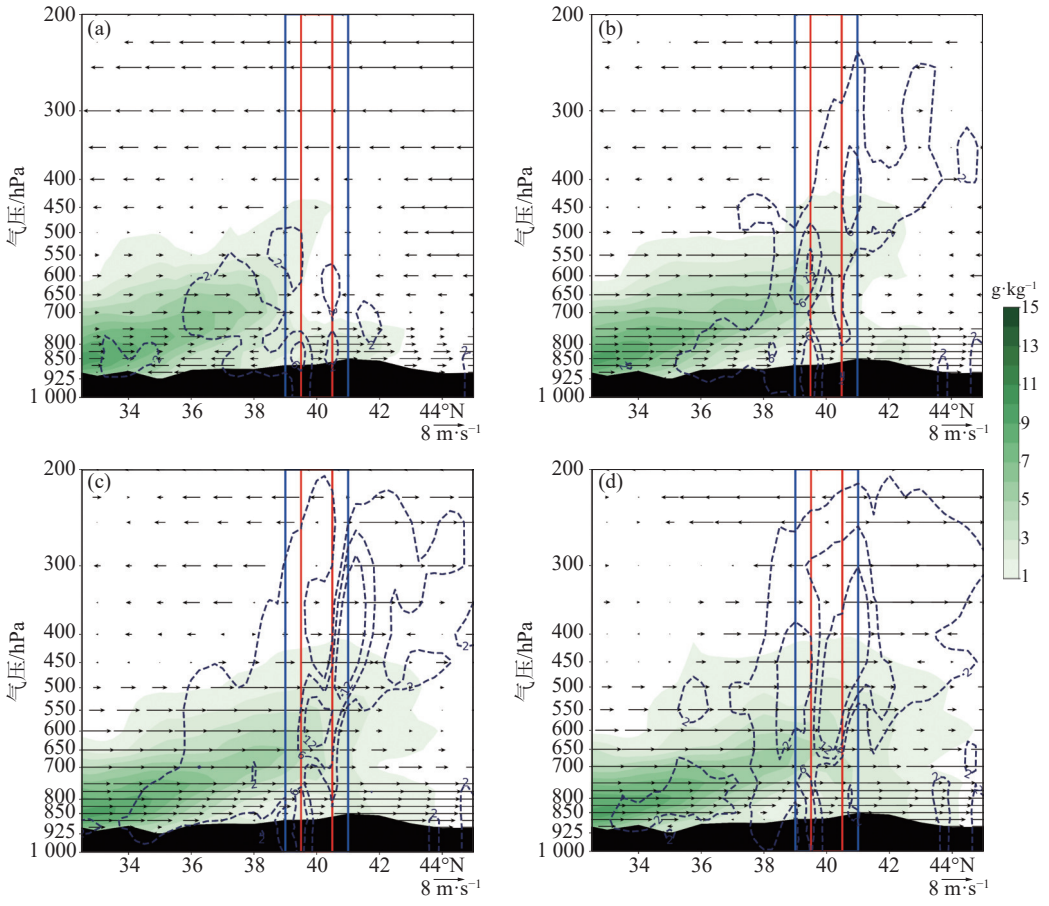


图 5 2018 年 4 月 4 日 08:00 (a)、12:00 (b)、14:00 (c)、16:00 (d) 沿 115°E 比湿 (绿色填色, 单位: g·kg^{-1})、垂直速度 (蓝色虚线, 单位: Pa·s^{-1})、水平速度 v 分量 (矢量, 单位: m·s^{-1}) 及地形 (黑色区域) 经向垂直剖面图 (红色方框为雷暴区域, 蓝色方框为暴雪区域)

Fig. 5 Meridional vertical cross-section diagram of specific humidity (green shading, unit: g·kg^{-1}), vertical velocity (blue dashed lines, unit: Pa·s^{-1}), horizontal velocity v-component (vectors, unit: m·s^{-1}), and terrain (black areas) along 115°E at (a) 08:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 14:00 BT , and (d) 16:00 BT on April 4, 2018 (The red box indicates the thunderstorm area, and the blue box indicates the heavy snow area)

暴触发-维持具有关键作用。图 5a 显示 08:00, 38°N 以南 650 hPa 以下存在 7 g·kg^{-1} 的高比湿区。此时 850 hPa 以下为偏南风, 以上为偏北风, 水汽输送条件尚未最优。12:00 (图 5b), 高低空均转为偏南风控制, 南风分量增强, 垂直输送高度升至 650 hPa, 降雪强度增大, 雷暴开始。14:00 (图 5c) 偏南风持续加强, 导致 700 hPa 高度附近形成显著的水汽积聚区, 降雪强度达到最大值。此时, 凝结潜热的释放有助于高架雷暴的形成, 并与雷电活动的密集阶段相对应。16:00 (图 5d) 水汽含量持续上升, 降雪维持, 但雷暴消退, 这可能与大气层结及不稳定抬升条件变化有关。

分析水汽通量散度和温度平流分布图 (图略) 可知, 低层 850 hPa 和 925 hPa 的位势高度上水汽通量散度为正值, 温度平流为负值, 表明低层回流冷空气虽途经渤海上空, 仍为干冷空气。中层 700 hPa 的水汽通量散度为负值, 温度平流为正值, 为暖湿气流层。中层暖湿气流层为高架雷暴提供了必要的热量和水汽条件。

逆温层的温度对比越显著, 其对上方空气的隔离作用就越强 (刘洲洋等, 2018)。图 2c 显示, 张家口地区在 08:00, 700 hPa 高度的温度为−3 ℃, 而 761 hPa 层的温度为−9 ℃, 存在明显的逆温现象。逆温层的分离效应能够减少逆温层对上方滑动空气的拖曳作用, 使得逆温层表面更接近于自由滑动的条件, 从而为更有效的对流活动创造有利环境。此外, 逆温层顶位于 700 hPa 以上, 这一高度显著高于苟阿宁等 (2024) 和袁韬等 (2024) 在南方高架雷暴研究中得出的 850 hPa 高度。逆温层的厚度约为 37 hPa, 低于苟阿宁等 (2024) 所总结的湖北冷季高架雷暴逆温层厚度 (超过 50 hPa) 以及袁韬等 (2024) 分析的南方高架雷暴逆温层厚度 (75 hPa)。这种逆温层的高度和厚度差异与华北地区的特定回流形势有关: 低层偏东的干冷气流在太行山的阻挡下堆积, 形成深厚冷垫, 是逆温层长期维持且高度偏高、厚度偏薄的主要原因。

高架雷暴的触发条件通常位于逆温层顶之上, 在此环境背景下, 本次过程上升气流只有攀升至 700 hPa 层以上时, 才有可能触发雷电。从垂直速度的演变情况来看, 12:00 (图 5b), 垂直上升运动发展至 300 hPa, 40 min 后, 闪电活动开始。14:00 (图 5c), 垂直速度达到峰值 12 Pa·s^{-1}, 影响范围扩展至 200 hPa, 这一时间点与降雪峰值出现的时刻吻合。垂直速度的大值区域集中在 39°—41°N, 与强降雪和雷暴集中的区域一致。可见, 水汽的水平输送与垂直运动的相互作用对雷暴和降雪的形成具有显著影响。

4.2 不稳定性条件

利用湿位涡对大气不稳定状态进行诊断分析 (图 6) 发现, 在高架雷暴落区内 MPV1 值在 700 hPa 以上始终为正, 大气在该区域处于对流稳定状态, 因此重点关注对称不稳定在本次过程中发挥的作用。08:00 (图 6a) 39.5°N 附近 850 hPa 高度出现 MPV1>0 且 MPV2<−0.2 PVU 区域, 表示逆温层下 (700 hPa) 存在对称不稳定能量, 此时未见雷暴。11:00 (图 6b), 39.5°N 附近 700 —500 hPa 高度内, MPV1>0, MPV2<−0.125 PVU 的对称不稳定区域形成, 在其上方 500 hPa 高度处斜升气流形成。13:00 (图 6c), 在 700 —500 hPa 高度内, MPV2 的绝对值增大至 2×10^{-1} PVU, 这一数值远超王宁等 (2023) 在山东地区针对雷打雪现象研究所计算分析的 1.4×10^{-1} PVU。此阶段, 可以观测到上方倾斜的上升气流明显增强, 并伴随有雷暴的发生。这一现象表明, 在稳定的大气层结中, 当 MPV2 的绝对值增大到一定程度时, 它可以成为触发雷暴形成的关键因素。

由闪电分布随时间的变化图 (图略)可知, 14:00 闪电强度达峰值, 此时 MPV2 高值区显著扩展, 与倾斜上升气流的进一步增强吻合。这一现象揭示了高架雷暴形成的一个重要机制: 逆温层顶的大气对称不稳定状态对于高架雷暴的形成具有决定性的影响。同时, 对称不稳定区域上方倾斜的上升气流在降雪与雷暴的生成过程中发挥着至关重要的作用。它不仅为水汽和能量的垂直输送提供了动力支持, 也为闪电现象的发生创造了有利条件。

5 高架雷暴的触发机制

为探究高架雷暴的触发机制, 本文首先利用 08:00 地面加密自动观测站的数据, 对高架雷暴发生前的风场和露点温度进行中尺度分析, 然后参照黄小刚 (2017) 研究方法, 采用1 000 hPa 与 850 hPa 绝对地转动量差 (ΔM) 调整分析初始气流抬升发展并触发高架雷暴的过程。

2018 年 4 月 4 日 08:00, 分析地面天气示意图 (图 7) 发现北京西部干线两侧的露点温差较大, 有利于暖湿空气与干冷空气的交汇, 从而增强垂直运动, 并促进降雪与雷暴能量的积聚。同时, 东南风与太行山地形的辐合作用增强了空气的上升运动, 与干线南退共同促进了雷暴区初始上升运动的形成。结合图 6a 可知, 在 39.5°N 暴雪区附近 (闪电区域南侧) 形成了弱的垂直上升运动, 但初始抬升因中性层结而受到抑制, 上升气流发展至 850 hPa 与 700 hPa 高度之间。从图 6c 可见, 在闪电较强阶段, 存在强盛

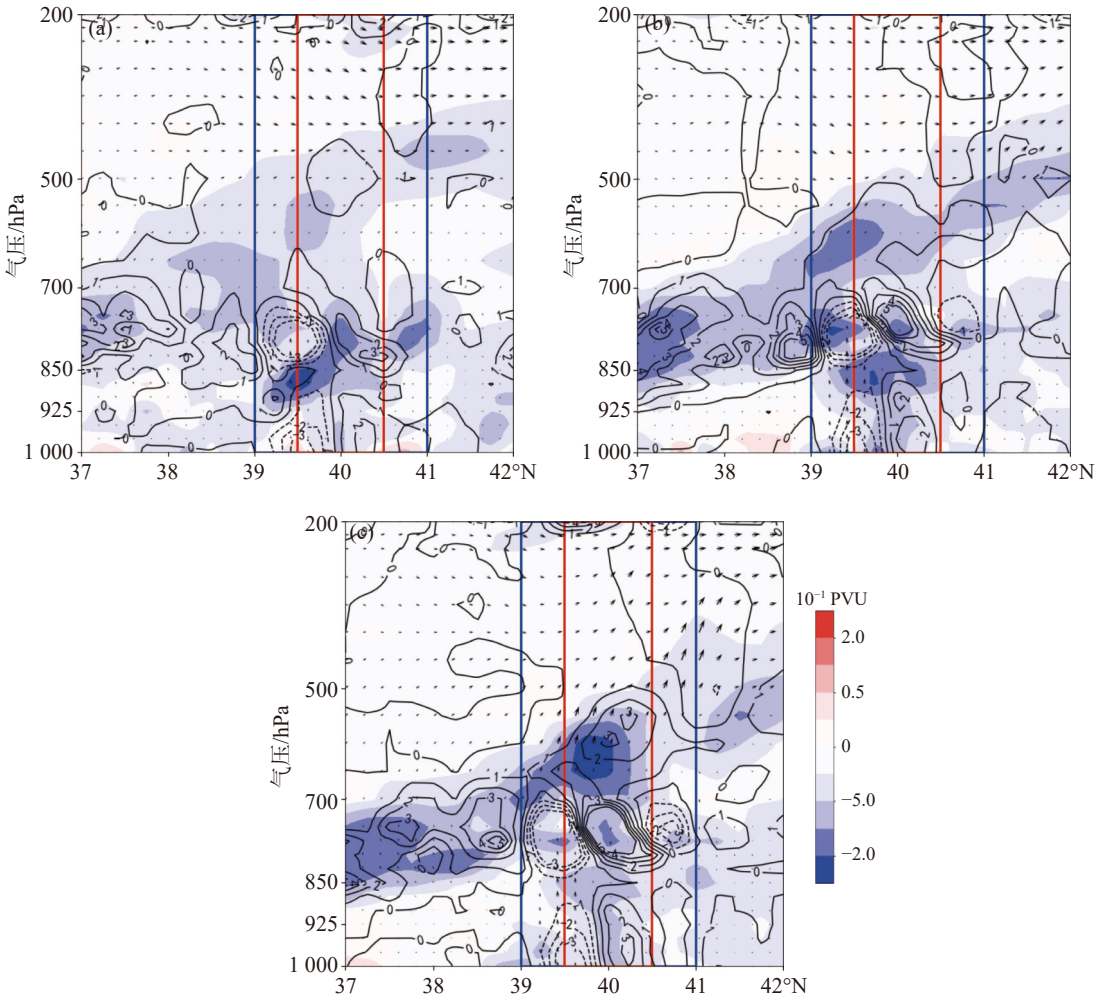


图 6 2018 年 4 月 4 日 08:00 (a)、11:00 (b)、13:00 (c) 沿 115°E MPV1 (等值线, 单位: PVU; 实线代表 MPV1>0, 虚线代表 MPV1<0) 和 MPV2 (填色, 单位: 10^{-1} PVU) 经向垂直剖面图

Fig. 6 Meridional vertical cross-section diagram of MPV1 (contour line, unit: PVU. The solid line represents MPV1>0, and the dashed line represents MPV1<0) and MPV2 (color map, unit: 10^{-1} PVU) along 115°E at (a) 08:00 BT , (b) 11:00 BT and (c) 13:00 BT on April 4, 2018

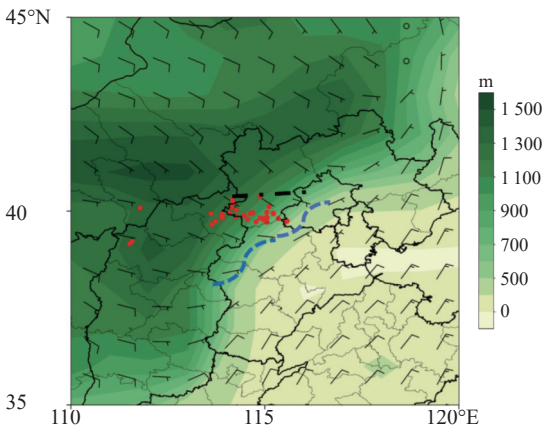


图 7 2018 年 4 月 4 日 08:00 干线 (黑色点划线)、地形辐合线 (蓝色点划线)、地面风场 (风向标, 单位: $m\cdot s^{-1}$)、闪电区域 (红色圆点) 叠加地形 (色斑) 示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the dry line (black dashed-dotted line), terrain convergence line (blue dashed-dotted line), surface wind field (wind barb), lightning area(red dots) superimposed on terrain (shaded) at 08:00 BT on April 4, 2018

的倾斜上升气流, 垂直发展到了 200 hPa 高度。在对流稳定的大气层结状态下, 气块若无外力作用, 将无法继续向上倾斜上升触发对称不稳定能量的释放, 因此必然存在某种机制促使低层垂直环流继续向上转为倾斜上升, 发展至 200 hPa 高度。

图 8 展示了 2018 年 4 月 4 日 11:00—14:00 沿 115°E 的 1 000 hPa 与 850 hPa 绝对地转动量差 (ΔM) 的分布特征。由图可知, ΔM 的峰值集中在 39.0°—40.5°N 的纬度带上。11:00—14:00, 40°N 附近的值 ΔM 显著上升, 这一趋势与闪电发生时间相吻合。为深入解析此现象, 下面基于垂直速度、假相当位温以及绝对地转动量的垂直结构进行了细致分析 (图 9)。

11:00 (图 9a), 初始垂直上升气流在 39°—40°N 范围内形成。而 850 hPa 至地面的大气呈中性层结状态, 因此垂直上升气流在达到 850 hPa 高度后迅速减弱。微弱的上升气流在穿越绝对地转动量等值线后, 在 500 —700 hPa 的高度范围内, 发展出倾斜上升

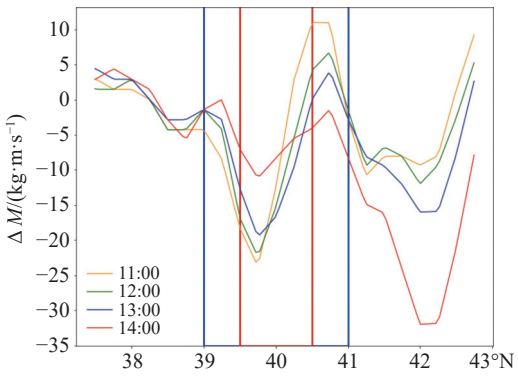


图 8 2018 年 4 月 4 日 11:00—14:00 沿 115°E 1 000 hPa 与 850 hPa 的绝对地转动量差 (Δ*M*) 的经向分布图

Fig. 8 Meridional distribution map of the absolute momentum difference (Δ*M*) between 1 000 hPa and 850 hPa along 115°E from 11:00 BT to 14:00 BT on April 4, 2018

气流，并沿着假相当位温面爬升。在 500 hPa 高度下形成了一个中心值 0.6 Pa·s^{-1} 的垂直速度分量大值中心。这表明 Δ*M* 调整是形成倾斜上升气流的关键因素。

12:00 (图 9b)，绝对地转动量等值线更加密集。39.5°N 纬度附近 850 —700 hPa 高度上升气流与绝对地转动量等值线几乎垂直相交。700 hPa上空形成了一个垂直速度分量达 1.5 Pa·s^{-1} 的倾斜上升气流。在倾斜上升气流的垂直速度分量大值中心附近，空气块倾斜上升并产生对称不稳定能量。强烈的倾斜上升气流突破了当天的逆温层顶 (700 hPa)。随后，在 12:45 触发了高架雷暴，对应闪电现象形成，且闪电落区 (红色方框) 与对称不稳定区域基本一致。14:00 (图 9d)，对称不稳定区域进一步扩大。倾斜上升气流从高绝对地转动量区域 (30 kg·m·s^{-1}) 上升至

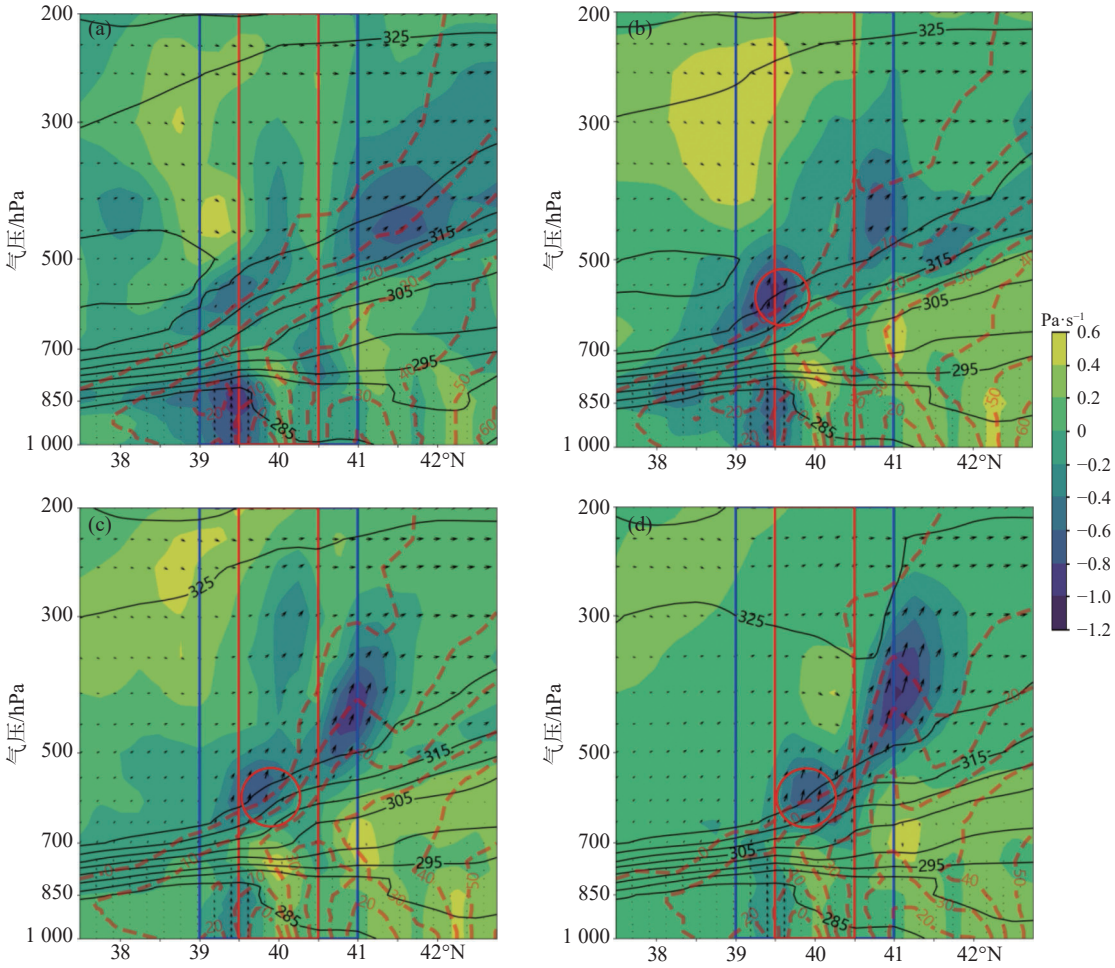


图 9 2018 年 4 月 4 日 11:00 (a)、12:00 (b)、13:00 (c)、14:00 (d) 沿 115°E 垂直速度 (填色，单位：Pa·s^{-1})、流场 (矢量，单位：m·s^{-1}，经向速度和垂直速度放大 50 倍的合成风场)、假相当位温 (实线，单位：K) 和绝对地转动量 *M* (红色虚线，单位：kg·m·s^{-1}) 经向垂直剖面图 (红色圆圈为对称不稳定区域，红色方框表示雷暴区域，蓝色方框代表暴雪区域)

Fig. 9 Meridional vertical cross-section diagram of vertical velocity (shaded, unit: Pa·s^{-1}), flow field (vectors, unit: m·s^{-1}, composite wind field with meridional velocity and vertical velocity amplified by 50 times), pseudo-equivalent potential temperature (solid lines, unit: K), and absolute momentum *M* (red dashed lines, unit: kg·m·s^{-1}) along 115°E at (a) 11:00 BT , (b) 12:00 BT, (c) 13:00 BT, and (d) 14:00 BT on April 4, 2018 (The red circles indicate regions of symmetrical instability, red boxes indicate thunderstorm areas, and blue boxes represent heavy snow areas)

低绝对地转动量区域 (0 kg·m·s^{-1})。在 ΔM 调整的作用下, 倾斜上升气流发展至 300 hPa高度以上, 在 400 hPa 附近形成了一个垂直速度大值中心, 最大速度−3.0 Pa·s^{-1}。此时张家口杨原出现了小时降雪量 7 mm 的强降雪和密集的闪电现象。15:00 (图略), 倾斜上升气流继续发展, 降雪天气持续。然而, 随着等绝对地转动量面与等假相当位温面的相对关系发生变化, 对称不稳定的条件不再满足, 对称不稳定能量已经释放完毕, 闪电现象也随之终止。

综上所述, 雷暴活动区域与对称不稳定区域大致重叠。初始上升运动向倾斜上升气流的转化机制源于绝对地转动量距平 (ΔM) 调整, 这一调整有助于初始上升运动在中性层结条件下进一步发展。当其上升至等绝对地转动量面坡度小于等假相当位温面坡度的区域时, 会产生对称不稳定, 成为形成高架雷暴的关键因素。与吴雪剑等 (2014) 建立的绝对地转动量距平调整模型对比, 本次过程整层大气呈稳定或弱中性层结。此背景下, 绝对地转动量距平调整对倾斜上升气流及条件对称不稳定起关键作用。与黄小刚等 (2017) 分析过程对比, 两者均发生在斜压大气中, 但对称不稳定形成区域不同。黄小刚等 (2017) 总结在 700—300 hPa 之间, 而本次在 500 hPa 以下。这种差异可能与地理纬度增加导致 f 值增大, 北方绝对地转动量值偏小有关。

6 结论与讨论

本文基于国家站、区域站观测数据、探空、闪电定位观测和 ERA5 再分析资料, 采用天气诊断和绝对地转动量距平调整等方法深入探讨了华北地区初春一次高架雷暴天气的环流形势、环境条件和雷暴触发机制, 得出以下主要结论:

(1) 此次高架雷暴发生在冷锋过境后的北侧冷区内, 属于华北冷季回流形势下的特殊天气现象。东路冷空气在太行山的阻挡下, 在山前区域形成了深厚的冷垫, 与 700 hPa 高度上的强西南暖湿气流相互作用, 构建了逆温层结构。逆温层的存在减弱了对上升空气的拖曳作用, 为对流活动提供了有利条件。

(2) 对流层中层的水汽输送对高架雷暴的形成和发展至关重要。700 hPa 南风分量的增强带来了丰富的暖湿气流, 为高架雷暴提供了必要的水汽条件。在上升过程中, 水汽释放的凝结潜热进一步促进了高架雷暴的发展, 为其提供了能量支持。

(3) 高架雷暴发生在逆温层上方的区域, 逆温层顶之上存在湿位涡 MPV1 大于 0 且 MPV2 小于 0 的区域, 表明该区域大气处于对流稳定状态但处在对称不稳定状态。当 MPV2 的绝对值超过一定阈值时, 高架雷暴形成, 这显示了对称不稳定机制在高架雷暴触发中的重要性。

(4) 本次高架雷暴的触发机制与绝对地转动量距平 (ΔM) 调整密切相关。在干线、地面辐合线和地形抬升的共同作用下, 形成了近地层初始垂直上升运动。尽管逆温层及上层大气对流稳定性对上升运动产生了抑制作用, 但初始上升运动在绝对地转动量差 (ΔM) 调整的作用下, 沿等熵面倾斜抬升至对称不稳定区域, 触发了对称不稳定能量的释放, 从而激发了倾斜对流的发展, 向上扩展至 200 hPa 高度, 形成了初春高架雷暴天气。

本次研究揭示了华北高架雷暴与南方高架雷暴之间的差异。首先, 华北高架雷暴的逆温层顶较高且厚度较薄, 这可能归因于该地区特有的回流气候条件。其次, 对称不稳定区域在华北高架雷暴中位于 500 hPa 高度以下, 较南方高架雷暴的对称不稳定区域范围小, 所处的位置偏低, 这可能与地理纬度较高导致的 f 值增大以及北方地区绝对地转动量值较小有关。鉴于本文仅分析了一次华北高架雷暴天气过程, 所得结论可能存在局限性。因此, 未来研究将针对华北高架雷暴天气过程进行更深入的分析, 以验证这些初步结论的普适性。

参考文献 (References):

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

苟阿宁,姚雯,雷彦森,等.2024.湖北冷季高架雷暴天气分类及环境参数特征分析[J].热带气象学报,40(1):23−32. Gou A N, Yao W, Lei Y S, et al. 2024. Environment parameter characteristics of different types of cold season elevated thunderstorms in Hubei [J]. Journal of Tropical Meteorology,40(1):23−32 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2024.003

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 Shanxi in early winter of 2016 [J]. Meteorological Monthly,44(11):1404−1413 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.11.003

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

黄晓璐,林弘杰,李一平,等.2021. 2020 年初内蒙古一次暴雪天气过程的成因分析[J].沙漠与绿洲气象,15(6):18−25. Huang X L, Lin H J, Li

Y P, et al. 2021. The causes analysis of the snowstorm event in the early winter of 2020 in Inner Mongolia [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(6):18−25 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2021.06.003

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. Climatology of cold season elevated convection in Northern China [J]. Meteorological Monthly, 44(2): 258-267. doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.02.005

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 X Y, LUO L, LI W J, 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

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 of characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in spring in China [J]. Meteorological Monthly,40(9):1058−1065 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.09.003

田秀霞,李娟,何丽华,等. 2011 年初冬华北南部回流暴雪诊断分析[J]. 暴雨灾害, 34(3): 243-251. Tian X X, Li J, He L H, et al. 2016. Diagnostic analysis of the backflow snowstorm in early winter of 2011 in the southern of North China [J]. Torrential Rain and Disasters, 34(3): 243-251 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.03.007

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]. Meteorological Science and Technology,51(4):562−572 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6354.20220286

吴雪剑,费建芳,程小平,等.2014.一次暴雨过程降水强度“双峰”结构成因分析[J].气象科学,34(3):252−260. Wu X J, Fei J F, Cheng X P, et al. 2014. Diagnostic analysis on precipitation intensity of the rainstorm with “double peak” [J]. Journal of the Meteorological Sciences,34(3):252−260 (in Chinese). doi:10.3969/2013jms.007

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/qxxb2016.075

袁韬,唐明晖,陈伟,等.2024.南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析[J].暴雨灾害,43(3):332−341. Yuan T, Tang M H, Chen W, et al. 2024. Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling region [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):332−341 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−165

曾庆锋, 力梅, 兰红平, 等.2018.闪电定位数据替代雷暴日人工观 测初探[J].干旱气象,36(5):813−819. Zeng Q F, Li M, Lan H P, et al. 2018. Preliminary research on replacement of thunderstorm days of artificial observation with lightning position detection data [J]. Journal of Arid Meteorology,36(5):813−819 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2018)−05−0813

郑永光,黄振强,陈炯,等.2024.对流风暴大气不稳定机制研究的若干问题[J].暴雨灾害,43(3):266−275. Zheng Y G, Huang Z Q, Chen J, et al. 2024. Some issues in studies on the atmospheric instability of convective storms [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):266−275 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−030

Corfidi S F, Corfidi S J, Schultz D M, et al. 2008. Elevated convection and castellanus: ambiguities, significance, and questions [J]. Weather and Forecasting,23(6):1280−1303. doi:10.1175/2008waf2222118.1

Goyal S, Kumar A, Mohapatra M, et al. 2017. Satellite-based technique for nowcasting of thunderstorms over Indian region [J]. Journal of Earth System Science,126:79. doi:10.1007/s12040−017−0859−2

Suparta W, Zulkeple S K, Putro W S. 2017. Estimation of thunderstorm activity in Tawau, Sabah using GPS data [J]. Advanced Science Letters,23:1370−1373. doi:10.1166/asl.2017.8391

Horgan K L, Schultz D M, Darid M, 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

Hunter S M, Underwood S J, Holle R L, et al. 2001. Winter lightning and heavy frozen precipitation in the southeast United States [J]. Weather and Forecasting,16(4):478−490. doi:10.1175/1520−0434(2001)016<0478:Wlahfp>2.0.Co;2

Kastman J, Market P, Fox N, et al. 2017. Lightning and rainfall characteristics in elevated vs. surface-based convection in the Midwest that produce heavy rainfall [J]. Atmosphere,8(2):36. doi:10.3390/atmos8020036

Koshak W J, Peterson M, Rudlosky S, et al. 2021. Applied lightning jump nowcasting and severe storm warning decision support [J]. Weather and Forecasting,36(4):1235−1250. doi:org/10.1175/WAF−D−21−0055.1

Morcrette C J, Browning K A. 2006. Formation and release of symmetric instability following Delta - M adjustment [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,132(617): 1073-1089. doi:10.1256/qj.04.108

Ma M M, Huang X G, Fei J F, et al. 2024. Characteristics of elevated thunderstorms on the cold side of fronts in China during the period 2017-2021 [J]. Monthly Weather Review,152(5):1823−1841. doi:10.1175/MWR−D−23−0246.1

Moore J T, Glass F H, Graves C E, et al. 2003. The environment of warm-season elevated thunderstorms associated with heavy rainfall over the central United States [J]. Weather and Forecasting,18(5):861−878. doi:10.1175/1520−0434(2003)018<0861:Teowet>2.0.Co;2

Patrick M, Kelvin G, Paula S, et al. 2019. Analysis of severe elevated thunderstorms over frontal surfaces using DCIN and DCAPE [J]. Atmosphere,10(8):449. doi:10.3390/atmos10080449

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

Trier S B, Wilson J W, Ahijevych D A, et al. 2017. Mesoscale vertical motions near nocturnal convection initiation in PECAN [J]. Monthly Weather Review,145(8):2919−2941. doi:10.1175/MWR−D−17−0005.1

(责任编辑 张 文)