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

北京一次高架对流下山加强特征及雷暴大风预报偏差分析

雷蕾 李桑 翟亮 陈明轩 肖现 刘瑞婷

Analysis of the characteristics of a strengthened elevated convection downhill and the forecast deviation of thunderstorm gales in Beijing

LEI Lei，LI Sang，ZHAI Liang，CHEN Mingxuan，XIAO Xian，LIU Ruiting

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-165

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

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

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

东北冷涡背景下弓形回波导致的雷暴大风成因分析

Analysis of the causes of thunderstorm winds caused by bow echoes under the background of Northeast China cold vortex

暴雨灾害. 2024, 43(6): 693-701 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-231

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

盛夏一次地面冷锋过境引发局地大暴雨的成因分析

Analysis on the local heavy rainfall caused by cold front in midsummer

暴雨灾害. 2021, 40(4): 393-400 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.007

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

雷蕾,李桑,翟亮,等.2026.北京一次高架对流下山加强特征及雷暴大风预报偏差分析[J].暴雨灾害,45(1):15−23. LEI Lei, LI Sang, ZHAI Liang, et al. 2026. Analysis of the characteristics of a strengthened elevated convection downhill and the forecast deviation of thunderstorm gales in Beijing [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):15−23 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−165

北京一次高架对流下山加强特征及雷暴大风预报偏差分析

雷蕾[1], 李桑[1], 翟亮[1], 陈明轩[2], 肖现[2], 刘瑞婷[2]
(1. 北京市气象台, 北京 100097; 2. 北京城市气象研究院, 北京 100089)

摘　要: 利用探空、雷达、自动站、风廓线等多源实况观测资料, 结合睿图-临近数值预报系统 (RMAPS-NOW) 四维变分同化热动力场分析数据, 初步分析了 2025 年 5 月 13 日北京首场强对流发展演变特征、下山加强条件和城区雷暴大风预报偏差原因。结果表明: (1) 这次强对流过程经历了北京北部、西部先后两个对流下山阶段, 造成北京春季罕见大范围大冰雹和北部地区局地雷暴大风天气。(2) 第一阶段北部地区山前边界层辐合线的形成有利于对流下山加强发展, 并在平原地区形成大范围冷池; 第二阶段西部地区在冷池上空形成高架对流, 其有利的动力触发和加强条件为冷池上方出现中低层西南急流爬升、风暴后侧西北风和前侧平原东南风辐合, 共同造成 1.5 km 高度以上深厚的辐合和垂直上升运动。(3) 对流在平原地区造成边界层大范围扩展的冷池, 第二阶段对流下山后地面温度梯度和变压差小, 冷池出流 (密度流) 弱; 同时后侧西北风入流急流在风暴内转为上升而非下沉气流, 未出现动量下传, 两者叠加造成第二阶段预报产生偏差, 高架对流下山后北京城区未出现预期的大范围雷暴大风天气。

关键词: 高架对流; 冷池; 对流下山加强; 热动力特征; 雷暴大风
中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−165

Analysis of the characteristics of a strengthened elevated convection downhill and the forecast deviation of thunderstorm gales in Beijing

LEI Lei[1], LI Sang[1], ZHAI Liang[1], CHEN Mingxuan[2], XIAO Xian[2], LIU Ruiting[2]

(1. *Beijing Weather Forecast Center*, *Beijing* 100097; 2. *Institute of Urban Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081)

Abstract: Using multi-source observational data including radiosonde, Doppler weather radar, automatic weather stations and wind profilers, combined with a thermodynamic analysis data derived from RMAPS-NOW 4D-Var data assimilation model, this study investigated the development and evolution characteristics, the intensification mechanisms after moving from the mountains to plain, and the deviation in urban thunderstorm gales forecasts for the first severe convective process in Beijing on May 13, 2025. The results are as follows: (1) This severe convection process experienced two successive phases of convection moving from mountains to plain in Beijing, earlier in the northern region and then in the western region, resulting in rare large-scale heavy hail across Beijing and localized thunderstorm gales in the northern areas in the spring seasons. (2) In the first phase, a boundary layer convergence line existed at the foot of the mountains in the northern region, which was conducive to the enhancement and development of convection movement from the mountains, and the formation of a large-scale cold pool in the plain areas. In the second phase, elevated convection formed over the cold pool in the western region. The favorable dynamic triggering and enhancement conditions were as follows: the low- to middle-level southwest jet stream climbing above the cold pool, and the northwest wind at the rear of the storm converging with the southeast wind in the plain at the front of the storm. These factors jointly led to deep convergence and vertical ascending motion above 1.5 km altitude. (3) Convection caused a cold pool with large-scale expansion within the boundary layer in plain areas. After the convection descended the mountains in the second phase, the temperature gradient and pressure difference were small, leading to weak cold pool outflow (density current). Meanwhile, the northwesterly inflow jet at the rear turned into ascending rather than descending airflow within the storm, with no

收稿日期: 2025−08−25; **定稿日期**: 2025−11−09
资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3004103); 国家自然科学基金面上项目 (42375020); 中国气象局“首都气象精准预报”青年创新团队项目 (CMA2023QN10)
第一作者: 雷蕾, 主要从事天气预报以及强对流预报技术与机理研究. E-mail: leilei_bjt@126.com
通信作者: 翟亮, 主要从事天气预报以及强对流等灾害天气预报技术研究. E-mail: liang6302@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

downward momentum transfer. The combined effects of these two factors resulted in the absence of the expected large-scale thunderstorm gales in downtown Beijing after the descent of the elevated convection in the second phase.

Key words: elevated convection; cold pool; thunderstorm downhill strengthened; thermodynamic characteristics; thunderstorm winds

引　言

北京地势西北高、东南低，三面环山，一面朝海，西部为太行山余脉，北部和东北部为燕山山脉，从高山 (海拔超过 1 000 m) 逐渐过渡到丘陵、台地 (海拔 200~500 m)，最终延伸至东南部的华北冲积平原 (海拔 20~50 m)。在复杂下垫面和边界层偏南风或渤海湾偏东风影响下，上游对流系统经过山区常经历多次加强和减弱的复杂变化，有的在到达平原之前减弱消失，有的则发展为有组织的对流系统移入平原 (陈双等, 2011; 肖现等, 2013, 2015)。因此，对流能否下山、强度如何演变、将造成何种类型的强对流天气，一直以来都是北京强对流天气的预报难点。

2008 年北京奥运会、残奥会期间开展的“北京 2008 预报示范项目 B08FDP” (Beijing 2008 Forecast Demonstration Project) 研究表明，北京周边的复杂地形对于雷暴短时间和小范围的生消演变影响非常大，平原地区的条件性不稳定、边界层辐合线、地形附近风速和水汽的辐合、山前的上升运动均有利于对流在山麓附近加强并向下游发展影响城区 (Wilson et al., 2010; 陈明轩等, 2010; 章丽娜等, 2014; 王丛梅等, 2017, 2018; Xiao et al., 2017, 2019)。Chen 等 (2012, 2014) 通过雷达气候学研究也发现，北京暖季雷暴从山区向东南部平原传播有明显的月变化和强度变化，傍晚时山脚和平原地区雷暴发生的概率最大，并且低层东南风和南风、垂直风切变和不稳定层结对于华北平原对流发展有显著影响。肖现等 (2013, 2015) 研究指出，冷池和低层环境风场相互作用是造成山上对流风暴增强传播下山的关键机制，且冷池的增强使得阵风锋具有“前冲”特征，从而激发出新的孤立单体。孙婧和程光光 (2017) 分析多个中尺度雷暴下山后强度变化，指出对流下山多个阶段条件更复杂，先下山的雷暴造成的冷池会消耗城区的热动力能量，不利于之后的对流下山发展。因此，复杂地形下雷暴下山的生命史和强度变化趋势受多种热动力因素的影响和制约，预报难度非常大。

2025 年 5 月 13 日北京出现当年首场强对流天气，先后经历了北部、西部两个对流下山阶段，造成北京春季罕见大范围大冰雹和北部地区局地雷暴大风天气。第一阶段的对流冷池并未造成第二阶段对流下山减弱，反而触发了高架对流下山增强。高架对流的概念由 Colman (1990a, 1990b) 首次提出，主要适合于冷季。近些年国内对于高架对流的研究也大多限于冷季 (盛杰等, 2014; 俞小鼎等, 2016; 刘洲洋等, 2018; 武威和许东蓓, 2025)。然而，Wilson 和 Roberts (2006) 研究表明，相对于地基对流，高架对流本质上指近地面稳定大气层结上方 900—600 hPa 触发起来的对流。暖季高架对流在美国较为常见，通常发生在夜间 (Moore et al., 2003)，其触发条件常与稳定层结上空低空急流带来的高能高湿环境中的高架辐合有关 (Colman, 1990b; Moore et al., 2003)。可见，高架对流无论出现在冷季还是暖季，其根本原因都是近地面冷性稳定层结上方在有利的触发条件下形成的深厚湿对流。这次北京地区冷池 (稳定边界) 之上形成的“高架对流”下山后显著增强的情况比较少见，预报员缺乏对其环境条件的清晰认识。此外，高架对流下山后北京城区雷暴大风空报原因及其不利条件是什么，针对这些问题有必要进行深入探讨，从而为今后业务中高架对流下山趋势预报以及减少雷暴大风空报提供临近预报思路。

1　资料和方法

本文使用的资料包括：(1) 2025 年 5 月 13 日北京地区稠密的区域自动气象站 (以下简称区域站) 和国家气象观测站 (以下简称国家站) 地面观测、北京观象台风廓线和 S 波段双偏振天气雷达分析这次强对流天气的雷达回波及偏振参量、大风等观测特征；(2) 冰雹实况采用北京 20 个国家站及各区信息员人工上报记录；(3) 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 逐小时、0.25°×0.25°分辨率第五代全球再分析资料 (ERA5) 用于大尺度环流背景场分析；(4) 北京城市气象研究院研发的睿图-临近数值预报系统 (RMAPS-NOW) 分析场数据用于进行对流系统及其近风暴热动力环境分析。RMAPS-NOW 是基于快速更新四维变分同化技术 (RR4DVar) 和自身的三维数值云模式，对京津冀 8 部新一代多普勒天气雷达资料 (径向速度和反射率因子) 进行快速四维变分同化，背景场实时融合稠密的区域站逐 5 min 观测资料与睿图-短期数值预报系统 (RMAPS-ST) 预报结果，能够提供逐 10 min 更新的京津冀地区 1 km 分辨率大气三维热动力、水凝物的实况分析产品，一定程度上弥补了北京地区边界层物理量场探测资料的不足，是强对流天气临近预报预警的有效工具。

2 天气实况

2025 年 5 月 13 日 16:00 (北京时, 下同)—14 日 02:00, 北京市平均降水量 8.9 mm, 最大降水量 56.6 mm, 最大小时降水量 52.7 mm (13 日 21:00—22:00) (图 1a)。强对流天气以大冰雹为主, 影响范围广, 13 个区上报出现冰雹, 单次降雹最长持续时间达 12~18 min, 最大冰雹直径超过 5 cm (图 1c, d), 在 5 月非常罕见。大冰雹造成万余起车辆受损, 理赔金额超亿元, 倒伏树木 300 余棵, 多处农业大棚被冰雹击穿, 经济作物损失惨重, 并有人员受伤。此外, 北部对流伴有 6~8 级短时大风, 最大阵风 11 级 (图 1b), 而西部对流阵风较弱, 尤其是城区雷暴大风出现了空报。

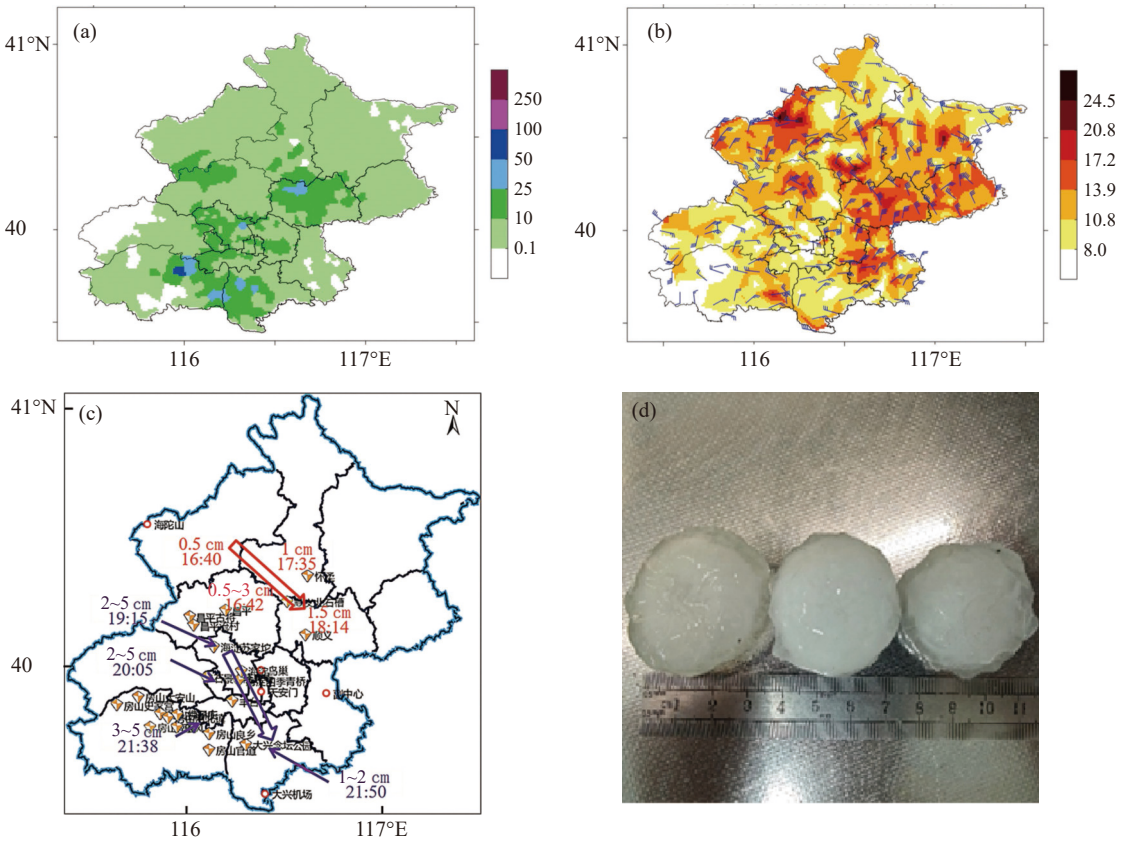


图 1 2025 年 5 月 13 日 16: 00—14 日 02: 00 降水量 (a, 单位: mm) 与极大风 (b, 风向杆, 色斑为风速, 单位: m·s^{-1}) 分布, 冰雹直径实况 (c, 橙色锥形为冰雹站点, 红色和紫色箭头分别代表第一和第二阶段冰雹路径) 以及大冰雹照片 (d)

Fig. 1 Distribution of (a) the rainfall amount (unit: mm), (b) instantaneous winds (wind barb, shaded indicates wind speed, unit: m·s^{-1}) , (c) hail diameter records (The orange cone marks a hail station, the red and purple arrows represent the first and second phases hail path, respectively) and (d) picture from 16:00 BT on 13 to 02:00 BT on 14 May 2025

3 天气背景

5 月 13 日京津冀地区 500—700 hPa 为宽广槽区内的偏西气流影响, 傍晚 700 hPa 高空槽逐渐靠近张家口, 槽后偏北风加大, 但冷槽偏西 (图 2a); 850 hPa 京津地区为切变线东侧西南风影响, 并且配合 20~24 ℃ 暖舌 (图 2b)。700—850 hPa 京津地区相对湿度较差, 饱和湿区位于高空槽和低层切变线附近。

北京观象台 13 日 08: 00 探空 (图 2c) 显示整层大气较干, 对流有效位能 (CAPE) 为 800 J·kg^{-1}, 同时 600 hPa 以下有较大对流抑制能量 (CIN 值 561 J·kg^{-1})。低层风向逆转, 垂直风切变较弱, 不利于对流发展。20: 00 (图 2d), 500 hPa 以下大气湿度有所增大, 925 hPa 以下转为偏东风, 有浅薄冷垫, 850 hPa 以上风向顺转, 700 hPa 西南风增强至 18 m·s^{-1}, 形成浅薄冷垫上强暖湿气流爬升的形势; 在 20: 00 近风暴环境下, 由 925 hPa 逆温层顶进行探空订正后, 自由对流高度 (LFC) 在 850 hPa, CAPE 高达 3 000 J·kg^{-1}以上, 基本无 CIN, 最优抬升指数 (BLI) 值−7.7 ℃, 不稳定能量显著增强; 此外, 中低层达到强垂直风切变 (0—3 km 和 0—6 km 垂直风切变分别为 20.9 m·s^{-1}和 22.9 m·s^{-1}) (表 1)。综上, 13 日傍晚北京逆温层之上具备了对流触发条件。

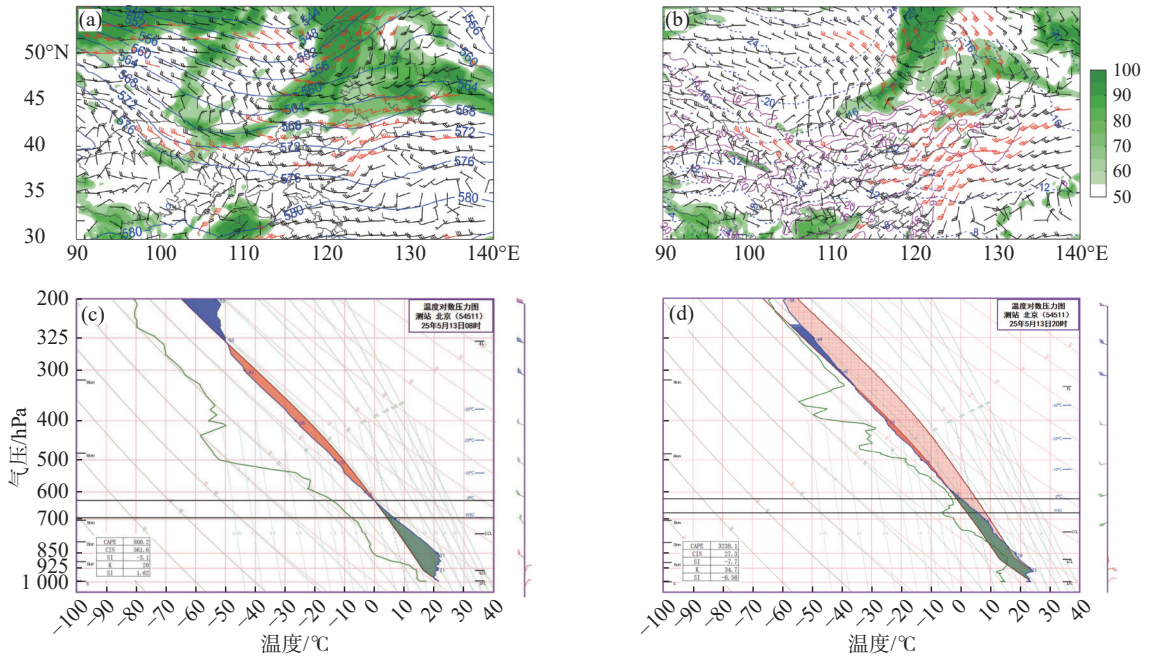


图 2 2025 年 5 月 13 日 16: 00 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm)、700 hPa 风 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 和相对湿度 (填色, 单位: %) (a), 500 hPa 温度 (蓝色虚线, 单位: ℃) 和 850 hPa 温度 (粉红色等值线, 单位: ℃)、风 (风向杆, 单位: m·s^{-1})、相对湿度 (填色, 单位: %) 分布 (b), 以及 08: 00 (c)、20: 00 (d) 北京观象台订正探空

Fig. 2 Distribution of (a) geopotential height (contour, unit: dagpm) at 500 hPa, wind (barb, unit: m·s^{-1}) and relative humidity (shaded, unit: %) at 700 hPa, (b) temperature (blue dash line, unit: ℃) at 500 hPa and temperature (pink line, unit: ℃), wind (barb, unit: m·s^{-1}) and relative humidity (shaded, unit: %) at 850 hPa at 16:00 BT, and revised sounding lifted from inversion layer top at Beijing observation station at (c) 08:00 BT and (d) 20:00 BT on 13 May 2025

表 1 2025 年 5 月 13 日北京观象台探空环境参数

Table 1 The sounding environmental parameters at Beijing observation station on 13 May 2025

时次	CAPE/(J·kg^{-1})	CIN/(J·kg^{-1})	BLI/℃	SHR3/(m·s^{-1})	SHR6/(m·s^{-1})	WBZ/m	WB-20/m	SWEAT
20时(逆温层顶订正后)	3 472.0	0.0	−7.7	20.9	22.9	3 361.0	6 324.0	411.0
08时	800.2	561.6	−3.1	6.9	14.3	3 120.0	6 098.0	47.6

注: SHR3为0—3 km垂直风切变; SHR6为0—6 km垂直风切变; WBZ为融化层高度; WB-20为-20 ℃层高度; SWEAT为强天气威胁指数。

4 对流下山演变特征以及加强条件和机制

4.1 对流下山演变特征

5 月 13 日傍晚至夜间, 北京先后经历了对流系统从北部燕山和西部太行山两个阶段下山影响北京平原和主城区的过程。

16: 00 之后, 第一阶段对流系统从西北部延庆-怀柔一带向东南方向昌平-顺义-平谷三区移动, 影响北京北部地区, 对流下山时面积增大、强度显著加强 (60 dBz 左右) (图 3a$_1$)。垂直结构呈现雹暴特征: 主体略前倾, 风暴顶有强辐散, 7 km 以下有深厚的辐合层, 前侧从边界层至 13 km 出现深厚垂直上升运动 (图 3a$_2$)。该对流系统造成北部地区较大范围 1~5 cm 冰雹。

第二阶段对流出现在北京西部沿山的浅山区 (地形 200 m 高度附近), 18: 00 之后昌平区喇叭口地形浅山区不断有新的对流生成并向东移动, 19: 00 之后对流加强形成西西南-东东北向带状, 长轴最长约 120 km, 持续 1 h 后范围缩小, 但 60 dBz 左右强回波维持超 2 h。带状对流长轴方向的三维结构显示, 5—10 km 高度有明显的悬垂结构, 西南风入流方向出现穹隆回波。带状对流向东南方向移动下山 (图 3b$_1$), 且下山时出现强烈发展, 45 dBz 以上的回波伸展至 10 km 高度, 同时高悬的反射率因子核降至地面, 造成石景山、海淀、朝阳等地大范围 2~5 cm 大冰雹 (图 3b$_1$, 3c$_1$)。

4.2 对流下山加强条件和机制

第一阶段对流系统下山前, 后侧中层和前侧低层出现西北风的入流和出流, 前侧出流与山前偏南风形成边界层辐合线 (图 3a$_1$ 中黑色虚线), 有利于对流下山加强。Wilson 等 (2010) 指出北京地区雷暴下山时, 如果平原地区形成辐合线, 沿着辐合线有积云充分发展, 则雷暴下山增强的可能性明显增加。但与此同时, 3 km 以下至地面出现深厚的雷暴冷池 (扰动温度−5~−2 ℃), 冷池前沿超前于风暴主体 10 km, 前侧暖湿入流距离风暴主体较远, 不利于风暴水汽

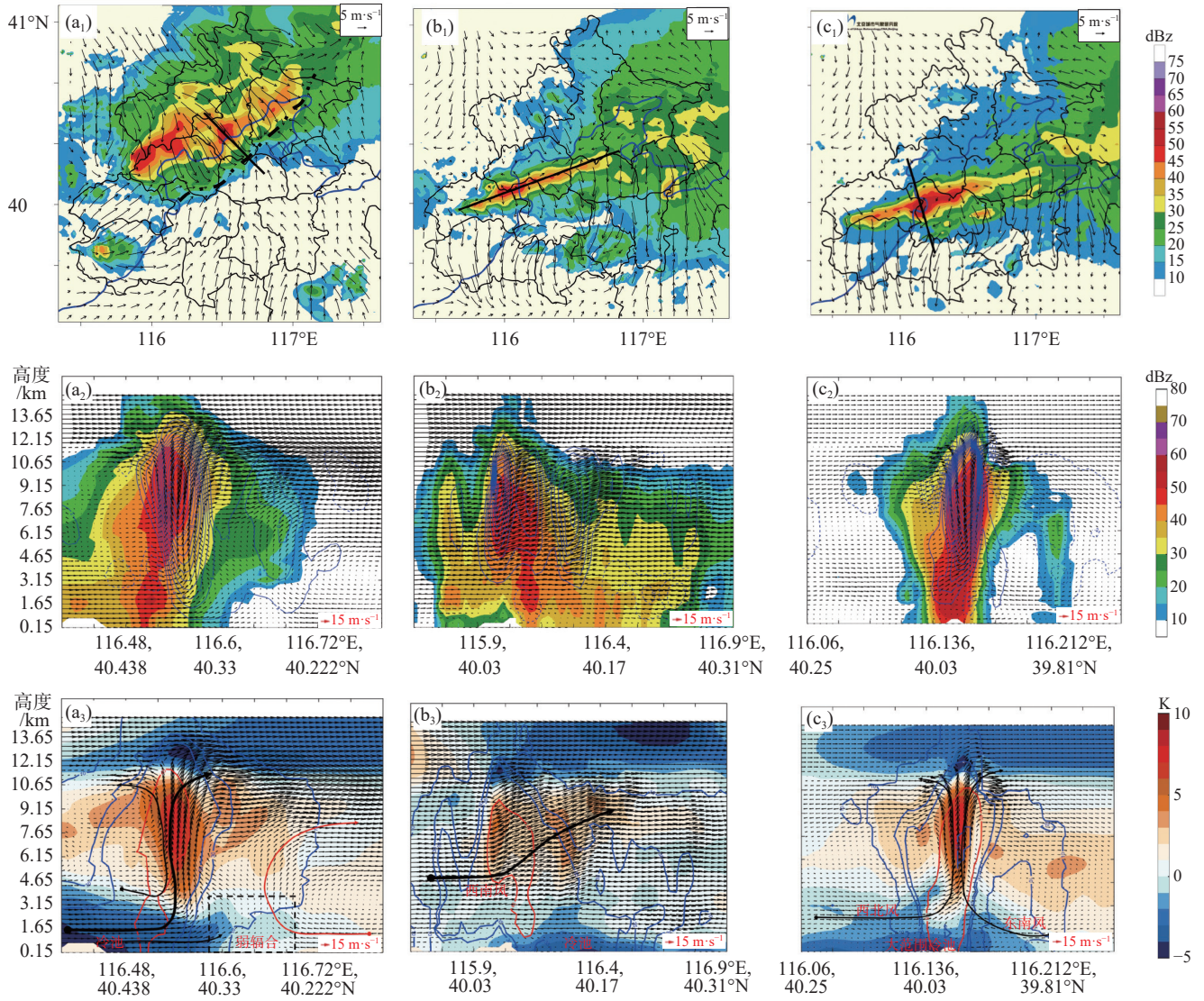


图 3 2025 年 5 月 13 日 17:24 (a_1, a_2, a_3)、19:18 (b_1, b_2, b_3)、20:00 (c_1, c_2, c_3) 京津冀组合反射率因子 (填色)、RMAP-NOW 模式 0.15 km 高度反演风矢量 (风向杆, 单位: m·s^{-1}, 蓝色细线为 200 m 地形高度, 黑色粗线为剖面位置) 分布 (a_1, b_1, c_1), 反射率因子 (填色)、三维风场 (矢量箭头)、垂直速度 (等值线, 单位: m·s^{-1}) (a_2, b_2, c_2) 及反射率因子 (等值线, 单位: dBz, 间隔 10, 30, 35, 45 dBz, 其中 45 dBz 为红色等值线)、三维风场 (矢量箭头)、扰动温度 (填色, 间隔 1 K) 剖面 (a_3, b_3, c_3)

Fig. 3 The (a_1, b_1, c_1) distribution of the composed radar echoes (shaded) and derived wind vector (barbs, unit: m·s^{-1}) at 0.15 km above ground level of RMAPS-NOW simulation model (blue line is 200 m height above ground level, black thick line is vertical profile area), profile of (a_2, b_2, c_2) reflectivity factor (shaded), 3D wind (vectors), vertical velocity (contours, unit: m·s^{-1}) , (a_3, b_3, c_3) reflectivity factor (contours, unit: dBz, 10, 30, 35, 45 dBz, 45 dBz is indicated with red line), 3D wind (vectors), perturbed temperature (shaded, interval 1 K) in Beijing area at (a_1, a_2, a_3) 17:24 BT, (b_1, b_2, b_3) 19:18 BT, (c_1, c_2, c_3) 20:00 BT on 13 May 2025

和能量的持续供应; 此外, 低层西北风出流超前于强风暴主体约 4 km, 冷池出流和暖湿入流在边界层的辐合较弱 (图 3a_3 黑色虚线框内), 因此北部对流系统下山先增强、后迅速减弱。

第二阶段对流下山前, 平原地区近地面为前期大范围对流冷池影响, 扰动温度中心约−4 ℃ 左右 (图 3b_3), 沿带状回波的长轴方向可见西南急流出现在冷池之上, 冷池内风速弱; 沿垂直于带状回波方向可见 (图 3c_3), 存在西北风和东南风在冷池之上的辐合抬升。平原地区近地面为明显的偏北风影响, 不存在山前或平原地区的辐合线, 从边界层动力条件来看, 不利于上游带状对流下山加强。但是, 冷池之上的西南风持续加强达到急流的程度, 3—9 km 高度出现深厚的辐合和强上升运动 (图 3b_2、3c_2), 导致风暴不断加强。北京观象台风廓线的中上层高度 1.5—4.0 km 的垂直上升速度 (其强上升中心位于 3.0—3.5 km, 700 hPa 急流附近) 与模式四维变分同化分析结果是一致的 (图 4)。因此, 第二阶段为高架对流下山加强, 其触发和下山机制有别于一般情况下对流下山加强机制。

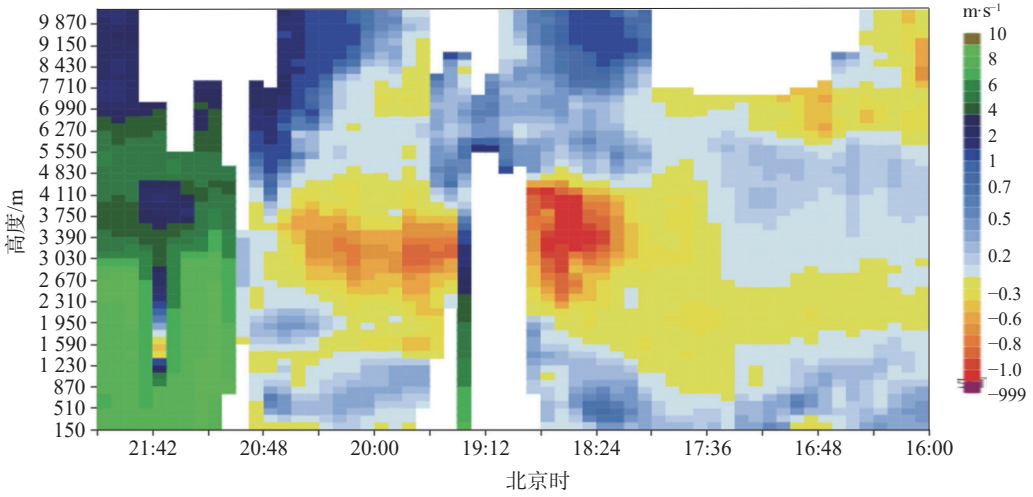


图 4 北京观象台 5 月 13 日 16: 00—22: 00 垂直速度时间高度剖面图

Fig. 4 Time–height cross-section of vertical velocity at Beijing observation station from 16:00 BJT to 22:00 BJT on 13 May 2015

5 强对流类型潜势预报及城区雷暴大风偏差及成因

5.1 城区强天气雷达监测特征

13 日 20: 00 后受强对流影响，门头沟及城区西部海淀和石景山出现 2~5 cm 大冰雹。北京观象台 S 波段双偏振雷达监测显示，带状对流上嵌着的椭圆形风暴单体反射率因子强度达到 65 dBz 以上 (图 5a)，且强反射率因子核高度从 1 km 伸展至 10 km (图 5b)，垂直累积液态水含量达到 60 kg·m^{-2}，有大冰雹特征。径向速度剖面来看 (图 5c)，5 km 高度以上出现后侧西北风入流，有中层径向辐合，但后侧入流并未下沉接地，近地面径向风 (东南风) 较弱，未出现西北

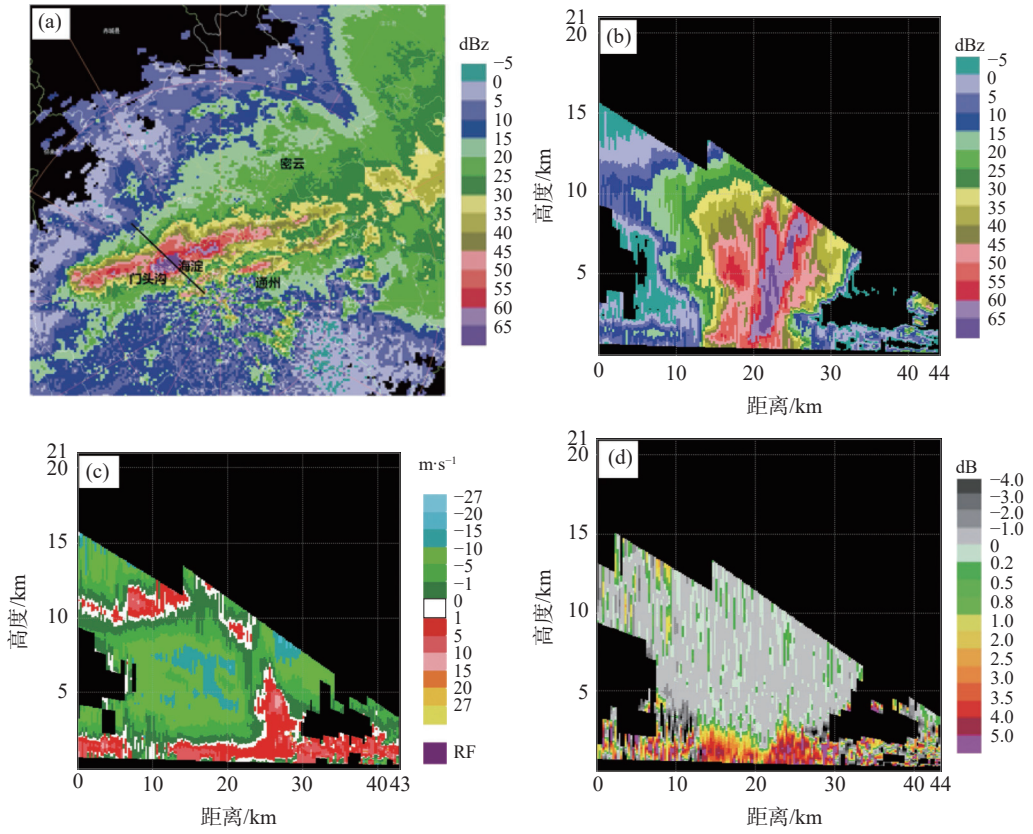


图 5 13 日 20: 00 北京观象台 S 波段双偏振多普勒天气雷达组合反射率因子分布 (a)，以及反射率因子 (b)、径向速度 (c) 和 ZDR (d) 剖面图

Fig. 5 The (a) distribution of the S-band double-polarization Doppler weather radar combined reflectance factor, the vertical chart of (b) the reflectance factor, (c) the radial velocity, (d) ZDR at 20:00 BT on 13 May 2025

方向的出流雷暴大风。此外, 强风暴低层出现差分反射率 (ZDR) 柱 (图 5d), 表征前部强上升运动。

5.2 强对流类型潜势预报

业务中雷暴大风定义为瞬时风速达到或超过 17.2 m·s^{-1} (8 级) 并在附近伴有雷暴活动的直线型大风。已有研究表明, 雷暴出流大风发生的有利条件主要包括: 垂直扰动气压梯度力造成强下沉气流、降水拖曳、降水相变产生的负浮力造成的地面阵风锋 (密度流)、高空向地面的动量下传、出流和环境风之间的水平气压梯度等 (Muller and Carbone, 1987; Markowski and Richardson, 2010; 俞小鼎等, 2020)。我国近年多发雷暴大风天气过程的研究也证明了强雷暴大风与中层干空气侵入 (顾小丽等, 2025)、后侧入流急流下沉到地面的动量下传 (彭霞云等, 2025)、强降雨 (大雨滴) 的水凝物拖曳 (王青霞等, 2025) 等因素存在直接的关系。

这次过程提前 24 h 强对流潜势预报表明 (图略), 北京 13 日傍晚能量大、700 hPa 以下干层深厚、下击暴流大风指数高且 0 ℃ 层和−20 ℃ 层高度合适, 上述特征均指示有利于出现雷暴大风和冰雹天气。实况冰雹预报正确, 而城区雷暴阵风仅 5 级左右, 雷暴大风预报显著偏强。对比预报与实况订正探空, 以及结合两个对流下山阶段的热动力特征来看, 第一阶段对流造成的大范围冷池对第二阶段雷暴大风偏弱有重要影响。

5.3 雷暴大风预报偏差及原因

第一阶段北部对流系统下山后, 对三维热动力场的分析表明, 3 km 以下至地面出现大范围深厚的冷池 (扰动温度−5~−2 ℃), 地面自动站 5 min 变温显示冷池范围远大于降水范围, 扩展到城区及西部沿山一带, 山前为冷池出流形成的东北风 (图 6a)。在已出现大范围降温的情况下, 第二阶段对流负变温仅局限在降水附近 (图 6b), RMAPS-NOW 模式扰动温度显示, 叠加了前期冷池后, 此时冷池范围广 (从风暴后侧扩展到前侧十几公里)、厚度 2 km, 冷池下游几乎无明显的正扰动温度区 (暖区弱), 因此冷池头部温度梯度弱, 较小的水平温差不利于出现强的密度流 (即冷池出流)。此外, 对流附近也无明显的雷暴高压和正变压 (图 7a、b), 因此气压梯度也不明显。与气压场配合, 风场表现为 1.5 km 以下虽然局地出现辐散和下沉气流, 但是强度弱、范围小; 3 km 高度之上, 后侧西北风入流进入风暴后与前侧冷池上方的东南风辐合, 形成强垂直上升运动, 并没有出现后侧入流急流的动量下传 (图 3c$_3$)。而彭霞云等 (2025) 的研究表明, 高架雷暴形成地面大风需要强下沉气流冲破逆温层并带动中层高动量下传。

综上, 这次高架对流雷暴大风空报的主要原因: 一是冷池范围广、前侧水平温度梯度弱, 雷暴高压和气压梯度均不明显, 造成冷池出流弱; 二是缺少后侧入流的动量下传作用。

6 高架对流下山概念模型

根据分析, 将第二阶段高架对流下山增强条件和高低空配置总结为图 8 的概念模型: 平原地区地

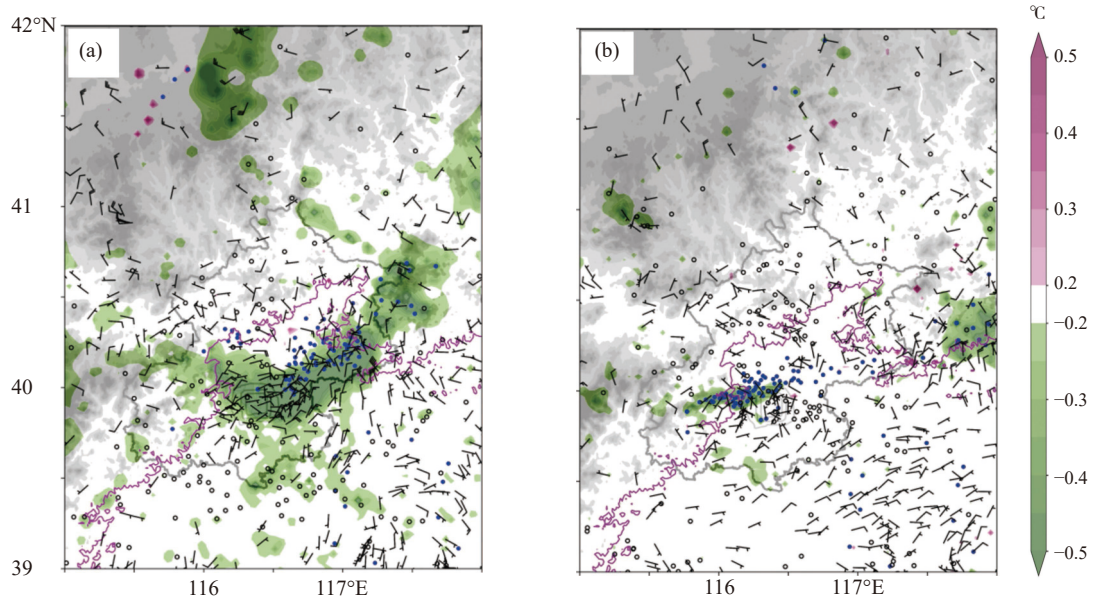


图 6 2025 年 5 月 13 日 18:30 (a), 20:10 (b) 京津冀区域站 5 min 变温 (填色, 单位: ℃)、当前分钟出现降水站点 (蓝色点) 和 2 min 平均风 (风向杆, 单位: m·s^{-1})

Fig. 6 The 5-minute temperature change (shaded, unit: ℃), stations with precipitation at the current minute (blue dots), and 2-minute average wind (wind barbs, unit: m·s^{-1}) of the regional stations in the Beijing-Tianjin-Hebei region at (a) 18:30 BT and (b) 20:10 BT on 13 May 2025

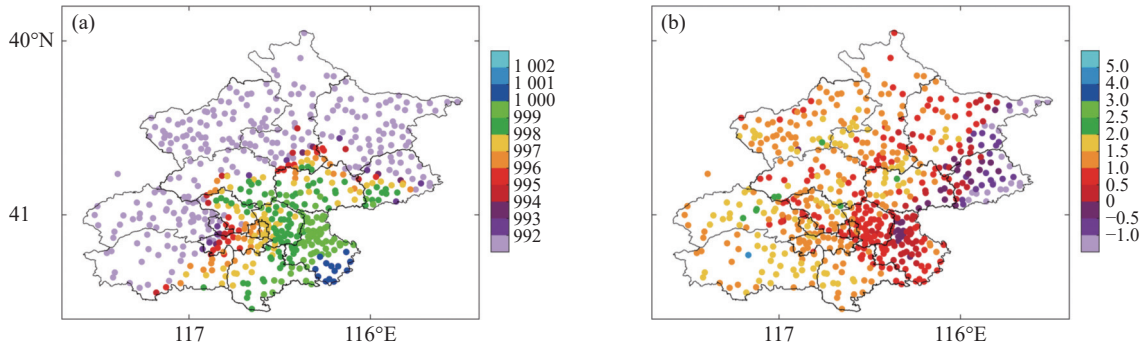


图 7 2025 年 5 月 13 日 20:00 北京地区地面气压 (a, 单位: hPa) 和 1 h 变压 (b, 单位: hPa)

Fig. 7 The (a) surface pressure (unit: hPa) and (b) 1 h pressure change (unit: hPa) in Beijing area at 20:00 BT on 13 May 2025

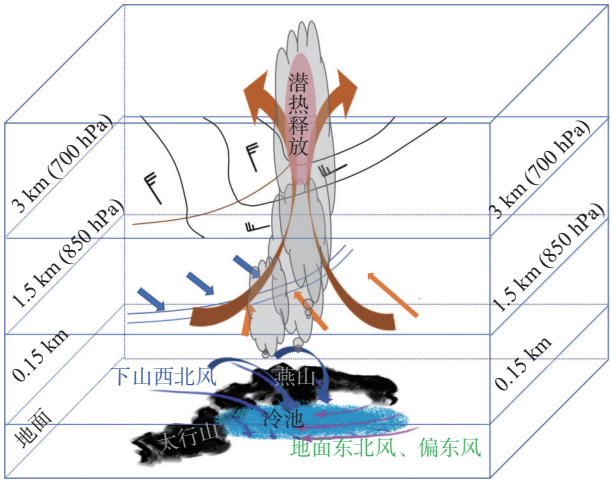


图 8 2025 年 5 月 13 日北京高架对流触发和下山加强概念模型

Fig. 8 Conceptual model of the elevated convection initiation and downslope enhancement in Beijing on 13 May 2025

面为大范围冷池, 冷池内东北风在西部山前转为偏东风, 冷池之上为弱东南风, 山区对流后侧有西北风入流, 二者在冷池之上几百米高度上形成辐合线; 中上层有高空槽前西南急流。冷池上方中上层大气出现深厚的辐合和强上升运动, 触发高架对流并发展加强向平原地区传播。

7 结论和讨论

本文利用多源观测资料和 RMAPS-NOW 四维变分同化模式资料, 分析了 2025 年 5 月 13 日北京首场强对流特征、第二阶段高架对流下山加强条件以及城区雷暴大风预报偏差, 得到以下结论:

(1) 这次强对流过程经历了北部、西部先后两个对流下山阶段。第一阶段北部地区山脚下形成边界层辐合线, 有利于对流下山加强, 造成了北部地区大冰雹和局地雷暴大风; 第二阶段西部浅山区在冷池上触发了高架带状对流并且下山加强, 造成城区大冰雹。

(2) 有别于北京暖季常见的对流下山加强, 高架对流下山加强的有利动力条件是: 700 hPa 西南急流在冷池上方爬升、风暴后侧西北风和前侧冷池上方东南风辐合抬升, 二者共同造成了距地 1.5 km 高度以上深厚的辐合和强上升运动。

(3) 边界层大范围冷池, 前侧水平温度梯度弱、雷暴高压和气压梯度均不明显, 造成冷池出流 (密度流) 弱; 同时高架对流后侧入流无明显的动量下传作用, 无法穿透冷池到达地面。两者叠加造成城区未出现雷暴大风, 从而预报出现空报。

综上, 高架对流是否能造成雷暴大风, 0~2 h 临近预报预警应判断三个重要条件: 雷达监测风暴后侧入流是否下沉穿过稳定层结达到地面、冷池前沿是否存在明显的温度梯度、地面是否出现明显的雷暴高压。

本文仅为个例分析, 有利于高架对流下山的环境条件以及强天气类型今后还需大量的个例进行分析和总结。

致谢: 在本文撰写过程中, 北京市气象局数据中心提供了实况观测资料, 北京城市气象研究院提供了 RMAPS-NOW 系统四维变分同化资料以及雷暴下山自动站分析产品, 谨致谢忱!

参考文献 (References):

陈明轩,高峰,孔荣,等.2010.自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用[J].应用气象学报,21(4):395−404. Chen M X, Gao F, Kong R, et al. 2010. Introduction of auto nowcasting system for convective storm and its performance in Beijing Olympics meteorological service [J]. Journal of Applied Meteorological Science,21(4):395−404(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2010.04.002

陈双,王迎春,张文龙,等.2011.复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J].气象,37(7):802−813. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, et al. 2011. Intensifying mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing Area [J]. Meteorological Monthly,37(7):802−813(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.7.004

刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等.2018.中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J].气象,44(2):258−267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al. 2018. Climatology of cold season elevated convection in Northern China [J]. Meteorological Monthly,44(2):258−267(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.02.005

顾小丽,肖王星,涂小萍,等.2025.宁波两次下击暴流的环境条件与多普勒雷达特征对比分析[J].暴雨灾害,44(3):340−351. Gu X L, Xiao W X, Tu X P, et al. 2025. A comparative study on environmental conditions and doppler radar echo characteristics of two downburst events in Ningbo [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):340−351(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−157

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

孙靖,程光光.2017.北京城区热动力条件对雷暴下山后强度变化的影响[J].高原气象,36(1):207−218. Sun J, Cheng G G. 2017. Influence of Thermal and Dynamical Conditions over Beijing City Area on Strength of Down-to-Hill Thunderstorms. Plateau Meteorology [J]. 2017,36(1):207−218(in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00007

盛杰,毛冬艳,沈新勇,等.2014.我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J].气象,40(9):1058-1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al. 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during spring[J]. Meteorological Monthly, 40(9): 1058-1065(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.09.003

王丛梅,俞小鼎,刘瑾,等.2018.弱天气尺度背景下太行山极端短时强降水预报失败案例剖析[J].气象,44(1):107−117. Wang C M, Yu X D, Liu J, et al. 2018. Analysis of a forecast failure case of extreme flash-rain under weak synoptic-scale background in Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly,44(1):107−117(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.01.009

王丛梅,俞小鼎,李芷霞,等.2017.太行山地形影响下的极端短时强降水分析[J].气象,43(4):425−433. Wang C M, Yu X D, Li Z X, et al. 2017. Investigation of extreme flash-rain events on the impact of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly,43(4):425−433(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.04.004

王青霞,唐明晖,吴亚昊,等.2025.基于多源观测资料的长沙“4·29”强对流天气过程分析[J].暴雨灾害,44(3):309−321. Wang Q X, Tang M H, Wu Y H, et al. 2025. Analysis of "4·29" severe convective weather event in Changsha based on multi-source observation data [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):309−321(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−112

武威,许东蓓.2025.中原地区冷季高架对流不稳定机制及雷达特征分析[J].高原气象,44(3):795−809. Wu W, Xu D B. 2025. Radar characteristics and instability mechanism of elevated convection during the cold season in central plains [J]. Plateau Meteorology,44(3):795−809(in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2024.00094

肖现,陈明轩,高峰,等.2015.弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J].大气科学,39(1):100−124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(1):100−124 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1403.13318

肖现,王迎春,陈明轩,等.2013.基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析[J].气象学报,71(5):797−816. Xiao X, Wang Y C, Chen M X, et al. 2013. A mechanism analysis of the thermo-dynamical field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing area with the radar data 4DVar [J]. Acta Meteorologica Sinica,71(5):797−816(in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.077

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. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convections [M]. Beijing: China Meteorological Press

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

章丽娜,王秀明,熊秋芬,等.2014. “6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J].暴雨灾害,33(1):1−9. Zhang L N, Wang X M, Xiong Q F, et al. 2014. On the evolution of mesoscale environment and influential factors of the heavy rainfall in Beijing on 23 June 2011 [J]. Torrential Rain and Disasters,33(1):1−9(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2014.01.001

Colman B R. 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part Ⅰ: A Climatology [J]. Monthly Weather Review,118:1103−1121. doi:10.1175/1520−0493(1990)118<1103:TAFSIE>2.0.CO;2

Colman B R. 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part Ⅱ: Organization and Instability Mechanisms [J]. Monthly Weather Review,118:123−1144. doi:10.1175/1520−0493(1990)118<1123:TAFSIE>2.0.CO;2

Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,117:D20115. doi:10.1029/2012JD018158

Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2014. Diurnal evolution and distribution of warm-season convective storms in different prevailing wind regimes over contiguous North China[J], Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 2742–2763. doi:10.1002/2013JD021145

Muller C K, Carbone R E. 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow [J]. Journal of Atmospheric Sciences,44(15):1879−1898. doi:10.1175/1520−0469(1987)044<1879:DOATO>2.0.CO;2

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 State [J]. Weather and Forecasting,18(5):861−878. doi:10.1175/1520−0434(2003)018<0861:TEOWET>2.0.CO;2

Markowski P M, Richardson Y P. 2010. Mesoscal Meteorology in Midlatitudes [M]. Chichester:John Wiley and Sons Ltd:407. doi:10.1002/9780470682104

Wilson J W, Feng Y R, Chen M, et al. 2010.Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems [J]. Weather and Forecasting,25:1691-1714. doi:10.1175/2010WAF2222417.1

Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observation and modeling perspective[J]. Monthly Weather Review,134(1):23-47. doi:10.1175/MWR3069.1

Xiao X, Sun J Z, Chen M X, et al. 2017. The characteristics of weakly forced mountain-to-plain precipitation systems based on radar observations and high-resolution reanalysis [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,122:1-21. doi:10.1002/2016JD025914

Xiao X, Sun J Z, Chen M X, 2019. Comparison of environmental and mesoscale characteristics of two types of mountain - to - plain precipitation systems in the Beijing region, China [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,124:6856–6872. doi:10.1029/2018JD029896

(责任编辑　张　文)