

杨荣芳,郭建平,孔凡超,等,2025. 京津冀地区风廓线雷达组网的对流触发信号判别[J]. 气象,51(10):1249-1260. Yang R F, Guo J P, Kong F C, et al, 2025. Discrimination of convection triggering signals from the wind profiler radar mesoscale network in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Mon, 51(10):1249-1260 (in Chinese).

京津冀地区风廓线雷达组网的对流触发信号判别^{*}

杨荣芳^{1,2,3} 郭建平⁴ 孔凡超⁵ 孟德利^{1,4} 张 震⁴
郭晓冉⁴ 单昱峰⁶ 邓剑波⁷

1 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,河北雄安新区 071800

2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021

3 河北省气象技术装备中心,石家庄 050021

4 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室,北京 100081

5 河北省气象台,石家庄 050021

6 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

7 湖南省气象科学研究所,长沙 410118

提 要: 利用京津冀地区 2023—2024 年 4—9 月风廓线雷达资料,借助三角形中尺度组网反演了 4 km 以下关键动力参数廓线,分析了对流触发前动力场的演变特征。结果表明:对流触发前,动力场表现为低层辐合、高层辐散的垂直上升运动特征。区域平均降水量与对流层中低层辐合和上升运动整体上存在正滞后相关性。降水前 30 min 内,水平散度小于 $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 1 km 以下的辐合厚度加深,增强的正涡度和持续加强的辐合上升运动有利于对流发生。可将 30 min 内水平辐合强度持续大于 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 作为对流触发信号判别指标。在统计的 763 次降水事件中,对流触发信号判别指标的有效识别降水事件准确率为 72.3%,为定量分析京津冀地区对流早期预警提供重要参考。

关键词: 风廓线雷达,对流触发,辐合上升,京津冀地区

中图分类号: P456, P411

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.060901

Discrimination of Convection Triggering Signals from the Wind Profiler Radar Mesoscale Network in Beijing-Tianjin-Hebei Region

YANG Rongfang^{1,2,3} GUO Jianping⁴ KONG Fanchao⁵ MENG Deli^{1,4}
ZHANG Zhen⁴ GUO Xiaoran⁴ SHAN Yufeng⁶ DENG Jianbo⁷

1 CMA Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Hebei, Xiong'an New Area 071800

2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

3 Hebei Meteorological Technology and Equipment Center, Shijiazhuang 050021

4 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

5 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

6 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

7 Hunan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118

Abstract: In this study, we analyze the evolution of the dynamical field before the occurrence of convection by using the dynamical parameter profiles below 4 km inverted from the wind profile radar mesoscale

^{*} 中国气象局大气探测重点开放实验室课题(2023KLAS02M)、中国气象局“揭榜挂帅”科技项目(CMAJBGS202307)和中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室开放课题(2023LABL-B06)共同资助

2024 年 12 月 12 日收稿; 2025 年 7 月 4 日收修定稿

第一作者:杨荣芳,主要从事数据质量控制和实况产品研发. E-mail:464322028@qq.com

通讯作者:孟德利,主要从事边界层热动力过程研究. E-mail:mengdeli15@mails.ucas.ac.cn

network from April to September during 2023—2024. The results show that before the convection triggering, the dynamical field is characterized by a vertical upward motion configuration with low-level convergence and high-level divergence. There exists the presence of positive time-lag correlations between area averaged rainfall and convergence in the lower to mid-troposphere. During the 30 min before precipitation, horizontal divergence is less than $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, with the convergence thickness below 1 km deepening, which means that the continuously enhanced convergence and upward motion favors the occurrence of convection. The horizontal convergence intensity sustained to be greater than $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ in the 30 min prior to precipitation is used as an indicator for the early signal of convection triggering. Among 763 precipitation events, the accuracy rate of effective identification of precipitation events is 72.3%. These findings can provide an important reference for quantitatively analyzing the early warning of severe convection in Beijing-Tianjin-Hebei Region.

Key words: wind profile radar, convection triggering, convergence and upward motion, Beijing-Tianjin-Hebei Region

引 言

京津冀地区近年强对流天气频发,给人民生活造成严重影响(郑永光等,2015)。许多学者对强对流天气形成的环境条件及触发机制开展了广泛、深入研究,主要集中在以下两方面:一是基于地面自动站、探空、天气雷达以及再分析等资料,对华北强对流天气学成因进行分析,研究极端暴雨系统发展演变结构特征和加强机制(梁钊明等,2014;符娇兰等,2017;雷蕾等,2017;许敏等,2022;张江涛等,2023;姚秀萍等,2024;杨晓亮等,2024);二是综合利用风廓线雷达、毫米波云雷达、微波辐射计等新型观测资料,引入低空急流特征量和垂直风切变动力场信息,开展低空急流成因、结构特征以及边界层急流研究,揭示对流系统抬升触发及维持发展机制(蔡雪薇等,2019;李青春等,2022;徐姝等,2024)。常规观测手段大多基于地面自动站、探空、天气雷达等观测和再分析资料,难以满足时空连续性观测的需求;而风廓线雷达、云雷达等新型观测设备具有连续遥感探测、高时空分辨率等优点,成为常规观测资料的重要补充,为开展近地层、边界层和自由大气的低空关键动力参数高时空分辨率协同反演提供了重要资料支撑。

国内外大量研究表明,大气动力、热力及水汽条件是对流天气触发的基本要素,而边界层强迫作用则是对流触发的重要机制(Kingsmill,1995;李志楠和李廷福,2000;侯淑梅等,2018;Solanki et al, 2021;崔新艳等,2021;段宇辉等,2025)。降水的产生除了水汽和不稳定层结的存在外,强盛、持续的上

升气流也是暴雨触发和维持的关键条件(俞小鼎,2012;张夕迪等,2023;李超等,2024)。风廓线雷达利用大气湍流多普勒效应,实现对大气湍流的多波束探测,提供高时空分辨率的大气水平风速、风向、垂直风速等三维风场信息。利用3个站点以上的风廓线雷达不同高度的水平风场,可实时反演高时空分辨率的水平散度、相对涡度、水平风切变和垂直速度等大气动力参数,结合天气雷达、云雷达以及卫星资料等,可捕捉对流触发前大气垂直动力、热力、水汽变化特征,为对流天气监测预警和短时临近预报提供重要参考(肖现等,2015;郭建平等,2021;Guo et al,2023)。目前京津冀地区单站风廓线雷达观测数据难以刻画整个区域实际动力场信息,为了弥补空间分辨率不足,可构建风廓线雷达三角形中尺度网,以获得高时空分辨率的三维水平散度、相对涡度和垂直速度场。

本研究基于地面气象观测站降水资料筛选京津冀地区2023—2024年4—9月降水事件,利用风廓线雷达组网反演的动力廓线和水平辐合强度构建对流触发信号判别指标,重点分析对流触发信号的演变特征,探究水平散度和垂直速度与降水的滞后相关性,并通过准确率评估对流触发信号判别指标的可靠性。

1 数据和方法

1.1 数 据

使用的数据为京津冀地区2023—2024年4—9月国家级地面气象观测站分钟级降水数据和风廓线

雷达实时采样高度上的产品数据(图 1a)。风廓线雷达均为边界层风廓线雷达,其探测廓线的时间分辨率为 6 min,垂直分辨率为 120 m。利用京津冀地区部署的 27 部风廓线雷达,构建了由 26 个三角形组成的中尺度网,可覆盖京津冀大部分平原区域(图 1b)。

1.2 方法

1.2.1 动力廓线参数反演算法

首先采用对数-线性拟合方案对风廓线雷达原始功率谱数据进行噪声电平估算和目标回波识别,然后结合三倍标准差法对异常点进行判别与剔除

$$D = \frac{(u_2 - u_1)(y_3 - y_1) - (u_3 - u_1)(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)(v_3 - v_1) - (x_3 - x_1)(v_2 - v_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{(v_2 - v_1)(y_3 - y_1) - (v_3 - v_1)(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)(u_3 - u_1) - (x_3 - x_1)(u_2 - u_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (2)$$

根据风廓线雷达反演的三维风场及水平散度动力配置信息,可分析对流天气触发前大气动力场的变化特征。

将水平散度从近地层向上积分,可反演出各高度层的垂直速度(w)(朱乾根等,2007):

$$w = - \int_0^{z_0} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz = - \int_0^{z_0} D dz \quad (3)$$

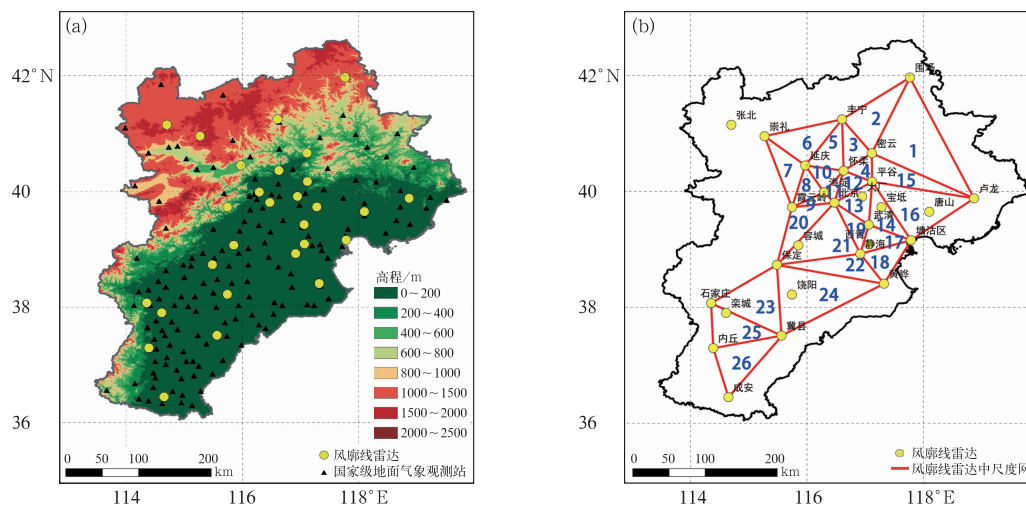
该方法可获取逐层的垂直速度,能够精密捕捉

(田玉芳和吕达仁,2016;陈泽等,2020),获取质量控制后的风廓线雷达径向谱数据,最后反演得到动力廓线参数(水平散度、相对涡度、垂直速度)数据。风廓线雷达三角形组网反演水平散度和相对涡度的基本方法是:根据某一个三角形 3 个顶点测站位置(x_i, y_i)的经纬度和地球平均半径,计算该三角形三个边的分量;结合某一层高度处 3 个测站的水平风数据(u_i, v_i)($i=1, 2, 3$)计算该层处三角形内的水平散度(D)和相对涡度(ζ);遍历三角形组网,得到中尺度网上空任意高度处的水平散度和相对涡度(崔一峰,1989;Guo et al,2023)。具体计算见式(1)和式(2):

中尺度组网内的上升运动,为判断中尺度对流系统的发生发展提供依据。

1.2.2 降水事件提取方法

利用京津冀地区 2023—2024 年 4—9 月国家级地面气象观测站分钟级降水资料,进行降水事件统计。为保证数据的准确性,首先对降水数据进行质量控制,主要采用极端阈值法与人工识别方法对异常数据进行剔除(Guo et al,2023)。首先,对于单个



注:图 b 中数字 1~26 分别表示三角形 $T_1 \sim T_{26}$,下同。

图 1 京津冀地区(a)国家级地面气象观测站、风廓线雷达和地形(填色)分布,
(b)风廓线雷达组网

Fig. 1 (a) Distribution of national meteorological observation stations, wind profile radar and topography (colored), (b) wind profile radar network in Beijing-Tianjin-Hebei Region

站点,发生降水事件的标准如下:(1)降水事件的开始和结束均以 6 min 降水量大于 0.1 mm 判定;(2)两个降水事件的时间间隔为 2 h 及以上;(3)降水开始后 60 min 内降水量超过 3.0 mm。由于本研究利用组网动力廓线提取三角形中尺度组网的对流触发信号,因此在单站降水事件的判断标准的基础上,定义了每个三角形区域降水事件的判断标准:(1)区域降水事件的开始和结束均以至少两个站点出现 6 min 降水量大于 0.1 mm 判定;(2)两个区域降水事件的时间间隔为 2 h 及以上;(3)每个区域降水事件开始时间与结束时间之间发生降水的累计时间大于或等于 1 h;(4)每个区域降水事件至少有 5 个以上的站点出现 1 次以上的单个站点同时降水事件;(5)每个三角形区域组网反演的水平散度在 3 km 以下无缺测值,构建的水平辐合强度和水平辐散信号判别指标(定义和计算方法见 1.2.3 节)在降水前 60 min 无缺测值。

1.2.3 对流触发信号判别指标

由水平散度计算出水平辐合强度。首先,在探测高度上自下而上搜索辐合或辐散的连通域;然后,根据连通域的水平散度值和高度,动态地计算相邻辐合和辐散连通域的水平散度差值;最后计算得到每条水平散度廓线对应的水平辐合强度(DI),计算如式(4)所示:

$$DI = \frac{1}{2} \text{sign}(H_{\text{con}} - H_{\text{div}}) \left(\sum_{i=1}^M D_{i_{\text{con}}} - \sum_{j=1}^N D_{j_{\text{div}}} \right) \quad (4)$$

式中:将连续 5 层以上水平散度为负值(正值)的高度区间识别为辐合(辐散)连通域, $H_{\text{con}}(H_{\text{div}})$ 为辐合(辐散)连通域所在平均高度, $M(N)$ 为辐合(辐散)域层数, $D_{i_{\text{con}}}(D_{j_{\text{div}}})$ 为辐合(辐散)的水平散度值;sign 为逻辑函数,若辐合域高度高于辐散域高度,sign 函数取值为-1,反之取值为 1。

水平辐合强度为正值时,表示低层辐合、高层辐散,其值越大,则低层辐合运动越强,越有利于对流触发;反之,当其为负值时,表示低层辐散、高层辐合,其值越小,则低层辐散运动越强,越不利于对流触发。因此,当水平辐合强度大于某一阈值时,可作为对流触发信号判别指标。

1.2.4 对流触发判别准确率

利用准确率(F)评估对流触发信号判别指标的可靠性:

$$F = \frac{k}{K} \times 100\% \quad (5)$$

利用漏报率(P)评估对流触发信号判别指标的误差率:

$$P = \frac{K-k}{K} \times 100\% \quad (6)$$

式中: k 代表对流触发信号判别准确的数量, K 为总样本量。

1.2.5 迟滞相关分析

皮尔逊相关系数(r)用于度量两个变量线性相关程度,可用于分析不同量纲数据间的相关性。本研究分析风廓线雷达反演的动力廓线参数与降水序列的滞后相关性:

$$r = \frac{\sum_{o=1}^l (x_o - \bar{x})(y_o - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{o=1}^l (x_o - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{o=1}^l (y_o - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: x_o 为单个或多个风廓线雷达三角形反演的第 o 个降水事件开始前的动力廓线参数值, y_o 为单个或多个风廓线雷达三角形第 o 个降水事件的面积平均降水量, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 l 个降水事件的动力廓线参数均值和单个或多个风廓线雷达三角形第 o 个降水事件的面积平均降水量。选取 0.5~4.0 km 高度风廓线雷达反演的动力廓线参数与三角形面积平均降水量进行了统计分析(Guo et al, 2023)。

1.2.6 对流触发降水事件判别方法

利用空间分辨率为 0.01°、逐 6 min 的天气雷达组合反射率因子,对风廓线雷达组网的对流触发降水事件进行辅助判别。对于每个三角形内的对流触发事件判别标准如下:(1)三角形内组合反射率因子平均值在 35 dBz 以上(曹林兮等, 2024);(2)三角形内组合反射率因子大于 35 dBz 格点数大于 700 个;(3)每一次对流降水事件的持续时间不小于 60 min;(4)两个对流降水事件的时间间隔不小于 120 min。

2 结果分析

2.1 对流触发前边界层动力场演变特征

2024 年 7 月 1 日,京津冀地区发生一次自西南向东北移动的降水过程。1 日 08:00(北京时,下同),500 hPa 上(图 2)影响京津冀地区的天气系统为低涡和高空槽,低涡位于内蒙古中部,高空槽位于

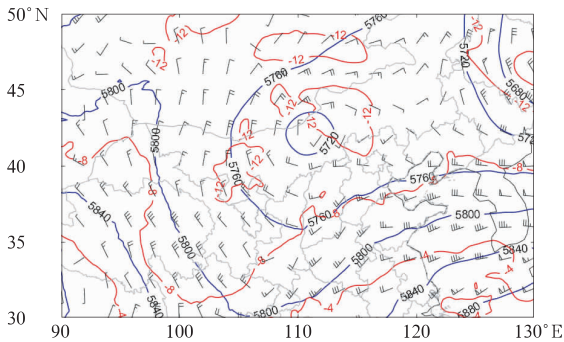
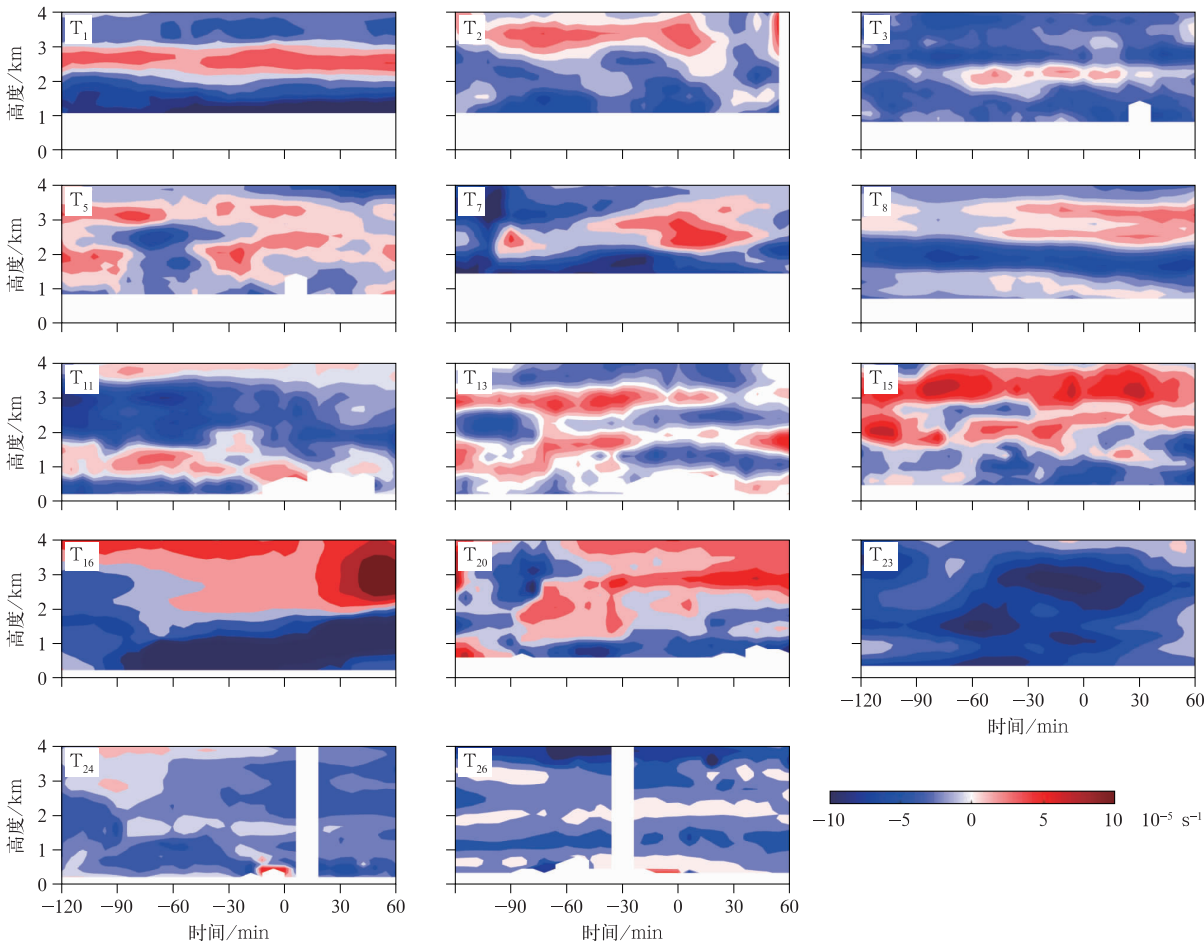


图 2 2024 年 7 月 1 日 08:00 500 hPa 位势高度场
(蓝色等值线,单位:gpm)、温度场
(红色等值线,单位:℃)和风场(风羽)
Fig. 2 Geopotential height (blue contour,
unit: gpm), temperature (red contour,
unit: ℃) and wind field (barb) at
500 hPa at 08:00 BT 1 July 2024

河套东部。降水期间,低涡稳定少动,高空槽东移加深,槽前西南气流水汽输送强盛,动力辐合上升作用明显,触发强对流天气。以此过程为例,分析对流触发前的大气动力场演变特征。

图 3 为 2024 年 7 月 1 日京津冀地区各三角形区域水平散度时间-高度演变。由图可见,在河北南部平原地区(三角形 T_{23} 、 T_{24} 和 T_{26})均表现为近地层至 4 km 高度上的辐合上升运动,河北北部和北京西部山区(三角形 T_7 、 T_8 和 T_{20})表现为近地层的辐合上升和 3 km 处的辐散下沉运动特征。此时近地层呈现较弱的南风和不明显的辐散,可能在一定程度上受到山脚处山谷风的影响。在河北东北部(三角形 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_{16})同样为近地层至 2 km 高度上的持续强辐合上升运动、2~3 km 高度上的辐散下沉运动。



注:横坐标中“0”表示降水开始时刻,小于 0 表示降水前,大于 0 表示降水后;空白区域无数据;下同。

图 3 2024 年 7 月 1 日京津冀地区各三角形区域降水事件平均水平散度的时间-高度演变
Fig. 3 Time-height evolution of the averaged divergence for precipitation events over the various
triangle areas in Beijing-Tianjin-Hebei Region on 1 July 2024

以三角形 T_{23} 为例,在降水前 120 min 内,从近地层至 4 km 高度表现为持续的辐合上升运动;降水前 60 min 开始 2 km 以下的辐合迅速增强;降水前 30 min 开始,水平散度值小于 $-5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 2~4 km 维持深层强辐合,最强烈的辐合发生在 3 km 高度处,水平散度值维持在 10^{-4} s^{-1} 量级,虽然垂直速度大于 $-0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),但仍为后续雷暴的形成提供了上升运动条件。此外,增强的南风加强了风场的水平旋转,在 1 km 高度附近处出现相对涡度最大值(约为 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) (图略),这种气旋式结构也有利于对流组织的发展。

降水前,三角形 T_{16} 上空辐合强度明显增强。最强烈的辐合在降水前 60 min 开始,一直维持在 1.5 km 高度以下,峰值达到 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,有利于对流组织的迅速增强。同时,三角形 T_1 也很好捕捉到了增强的辐合和上升气流运动,即使此时距对流组织到达该地还有将近 60 min。

为了进一步探究对流触发前关键动力参数变化规律,分析了 2023—2024 年 4—9 月地面气象观测站统计的 763 次降水事件发生前 120 min 内风廓线雷达中尺度网反演的关键动力参数垂直分布。随机抽取 70% (534 次) 作为判别指标建立样本,其余 30% (229 次) 作为检验样本。由图 4 可知,降水前 120 min,平均水平散度为负值、相对涡度为正值、垂直速度为负值,即表现为持续的辐合上升运动。对于水平散度(图 4a),降水前 60 min 开始辐合运动增强,尤其是在降水前 30 min 开始,散度小于 $-5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,且辐合厚度增加。对于相对涡度和垂直速度(图 4b, 4c),降水前 30 min,增强的正涡度和上升运动更有利于对流发生。

对风廓线雷达中尺度网反演的关键动力参数与降水序列的滞后相关性进行了分析。由图 5a 可知,区域平均降水量与对流层中低层的水平散度之间存在负相关,而水平散度的值越小(负值),辐合越强,即降水与辐合存在正相关;降水量与低层相对涡度存在正相关(图 5b),即相对涡度的值越大(正值),气旋运动越强,降水量越大。在降水前 30 min 内,1~3 km 高度上水平散度和降水量之间的负相关性增强,这与持续增强的辐合上升运动有关。由此表明,对流层低层辐合可以在一定程度上影响对流触发。其中三角形 T_1 (密云—围场—卢龙)降水与提前 60 min 之内水平散度的负相关性最显著,与 30 min 之内水平散度的相关系数小于 -0.4 (图略)。这可

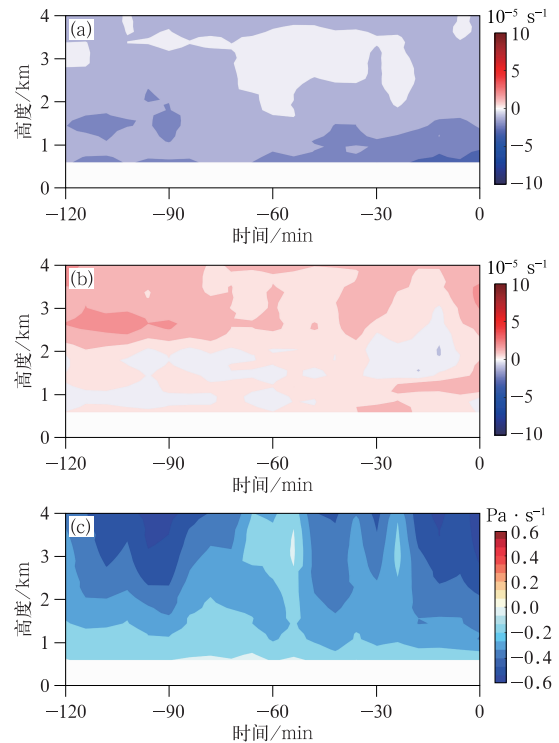


图 4 2023—2024 年 4—9 月京津冀地区降水事件风廓线雷达组网反演的关键动力参数时间-高度演变

(a) 水平散度, (b) 相对涡度, (c) 垂直速度

Fig. 4 Time-height evolution of key dynamic parameters retrieved from the wind profile radar network for precipitation events in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023–2024

(a) horizontal divergence, (b) relative vorticity, (c) vertical velocity

能是因为三角形 T_1 位于北京东北部的燕山脚下,夏季对流层中低层盛行的西风 and 西南风受山脉阻挡,抬升作用对于该区域的降水起主导作用。同时城市的绕流作用使得近地层流线在城市的下风向汇聚辐合,有利于对流触发或增强移入的对流系统。相比之下,三角形 T_8 (海淀—延庆—霞云岭) 中呈现出降水量与水平散度相对较弱的相关性(图略)。这种较弱相关性可能与地形影响有关,其中海淀站位于山前,受低层南风影响;延庆站位于山后盆地,夏季山谷区域可能是西风;霞云岭位于西部山区,和海淀之间的海拔也相差很大。

区域平均降水量与降水前垂直速度的滞后相关分析结果(图 5c)显示,区域平均降水量与 2~4 km 高度上的上升运动在降水前 30 min 具有正滞后相关性;但由于临近降水前水汽含量增加、水滴粒子直径变大,风廓线雷达观测到的垂直速度主要以水

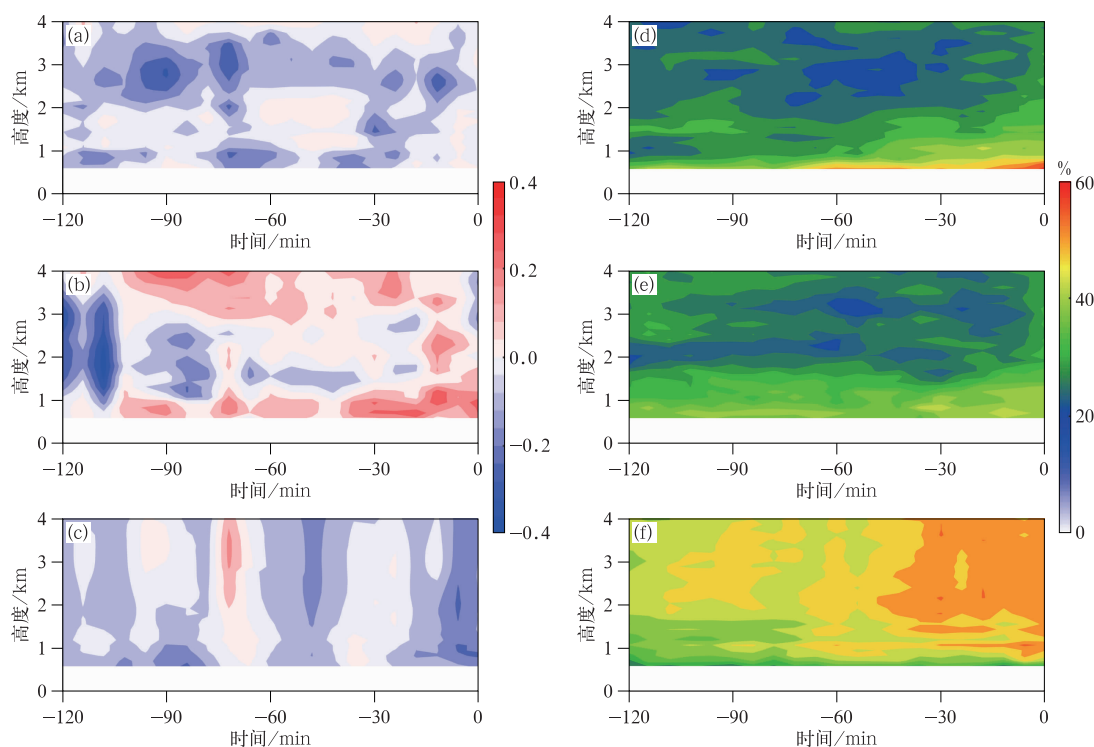


图5 2023—2024年4—9月京津冀地区降水事件(a~c)平均降水量和(a)水平散度、(b)相对涡度、(c)垂直速度的滞后相关系数及(d~f)三角形区域(d)强辐合、(e)正涡度和(f)强上升运动发生频率的时间-高度演变

Fig. 5 Time-height evolution of (a~c) the time-lag correlation coefficient between the average precipitation and (a) horizontal divergence, (b) relative vorticity and (c) vertical velocity respectively, and (d~f) the occurrence frequency of (d) strong convergence, (e) positive vorticity and (f) strong upward motion within the triangular areas for precipitation events in Beijing-Tianjin-Hebei

Region from April to September during 2023–2024

滴粒子下落为主,导致降水前 20 min 开始表现为负滞后相关性。对于三角形 T_3 (丰宁—怀柔—密云),近地层水平辐合和垂直速度与降水量的相关性更强,这可能与怀柔和密云站点位于山区,山前气流的辐合抬升运动有关。而对于其他三角形,2~4 km 高度持续的上升运动更能指示对流触发和降水的发生。需要注意的是,水平风和垂直速度的反演误差可能随着高度的增加而累积;此外,复杂地形和过大的三角形角度也会增加三角形组网反演的水平散度、相对涡度和垂直速度的不确定性。

以往针对京津冀地区暖季(4—9月)降水事件的许多研究表明,短时降水事件对夏季降水的频率和数量都有很大贡献。因此,本文定义强辐合(水平散度 $\leq -1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)发生的频率来量化上述结果。从图 5d 可以明显看出,大约 40% 的降水事件在 1~2 km 高度处出现强烈的辐合信号,提前时间

为 30 min。当降水发生时,1 km 左右强辐合信号的频率增加到 50% 以上,最高可达 60%,这说明近地层的持续强辐合更有利于对流触发(图 5a)。相比于西部山前区的三角形 T_6 ,东部平原区的三角形 T_{16} 在降水增强前出现强辐合信号的频率更高,这同样可能是由于山脉地形对风场产生的水平和垂直扰动(段宇辉等,2025)。降水发生前强上升运动(垂直速度 $\leq -0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)出现频率如图 5f 所示,结果表明超过 50% 的降水前 30 min 在 1~4 km 伴随上升运动。

进一步地,图 6a 给出了降水前 120 min 内不同高度水平散度的变化。在近地层(1 km 以下),水平散度表现为持续的辐合加强,即由前 120 min 的 $-0.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 到降水开始时刻的 $-2.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,其变化率为 $-1.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot (60 \text{ min})^{-1}$ 。在 1~2 km 高度处,水平散度同样地表现为辐合加强,

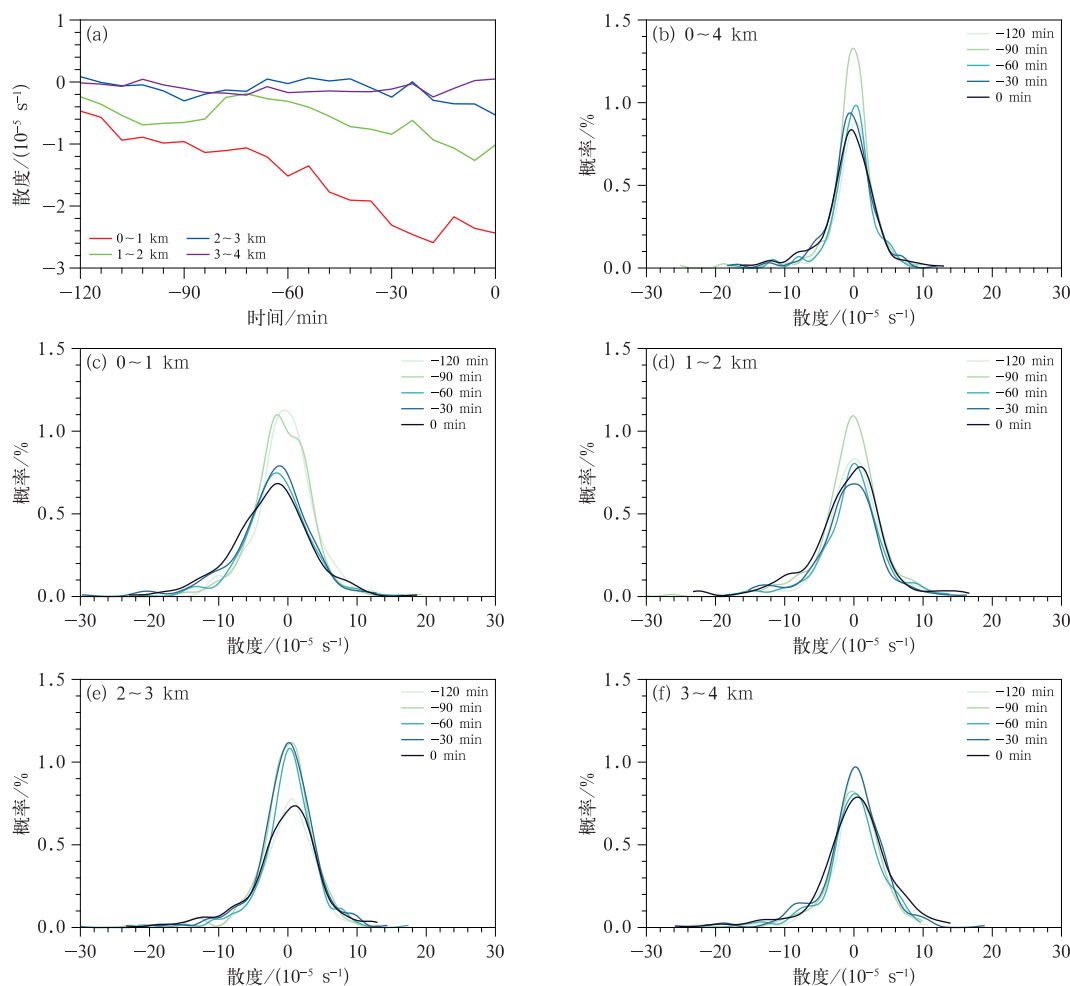


图 6 2023—2024 年 4—9 月京津冀地区降水事件 (a) 水平散度的时间序列, (b—f) 不同高度区间的水平散度概率密度分布

Fig. 6 (a) Time series of horizontal divergence, and (b—f) probability density of horizontal divergence at different altitude intervals for precipitation events in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023—2024

由前 120 min 的 $-0.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 到降水开始时刻的 $-1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 其变化率为 $-0.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot (60 \text{ min})^{-1}$, 但要比近地层的辐合强度弱些。在 2~3 km 和 3~4 km 处, 水平散度虽然也呈现出了弱辐合, 但变率较小。

由不同高度的水平散度概率密度分布可见, 水平散度呈现出近似正态分布(图 6b)。同样, 降水前 30 min 内, 1 km 以下辐合运动加强(图 6c), 而在 2~3 km 和 3~4 km 处, 辐散运动加强(图 6e, 6f)。

基于上述统计分析, 风廓线雷达反演的水平散度和垂直运动可以为研究降水前动力场的演变特征提供重要观测证据。但由于京津冀地区受到复杂地形和超大城市下垫面造成的复杂环流的影响, 因此在应用于对流触发信号提取时, 需要考虑地形条件

对组网反演关键动力参数精度的影响。

2.2 对流触发信号判别指标特征

由上文可知, 持续加强的低层辐合上升运动可以较好地指示对流事件的发生(黄玥等, 2024; Huang et al, 2024), 可以由水平辐合强度定量地分析对流触发信号演变特征。图 7 给出了对流触发前水平辐合强度不同分位数的时间序列。水平辐合强度平均值在降水前 60 min 内为正值, 且在降水前 30 min 内逐渐变大, 其值可达 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 表明辐合运动持续增强, 同时, 50%、75% 和 90% 分位数的水平辐合强度值也表现为持续增加趋势。因此, 可将降水前 30 min 内水平辐合强度持续大于 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 作为对流触发的判别指标。

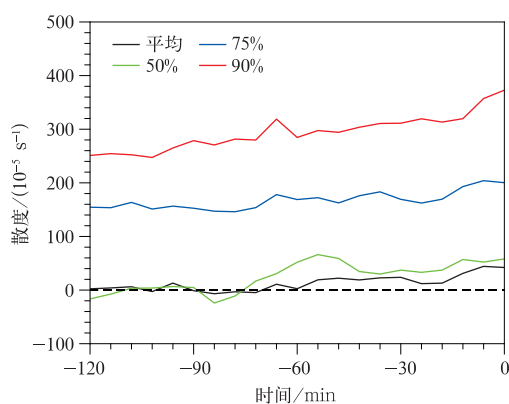


图7 2023—2024年4—9月京津冀地区降水事件不同分位数和平均的水平辐合强度时间序列

Fig. 7 Time series of the horizontal convergence intensity at different quantiles and the average for precipitation events in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023-2024

图8给出了降水前不同阶段2 km以下水平辐合强度的概率密度分布。可以看到,在降水前30 min内水平辐合强度变大,表明低层水平辐合、中高层辐散运动加强,更有利于对流的触发。

计算了每个三角形在对流触发前30 min内2 km以下水平散度、相对涡度、垂直速度以及水平辐合强度的平均值统计结果(表略)。在平原地区(三角形 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{17} 、 T_{21} 和 T_{23})表现出强烈的低层辐合上升运动。在河北北部山区(三角形 T_1 和 T_6)对流触发前低层辐合上升运动强烈,其中三角形 T_1 的水平散度为 $-7.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,水平辐合强度为 $274.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,表明河北东北部山区是对流天气触发的高发区。对流触发前平原地区水平辐合

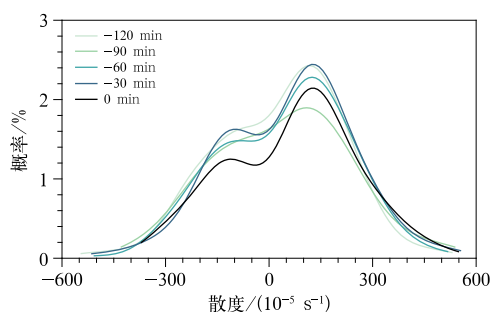


图8 2023—2024年4—9月京津冀地区降水事件2 km以下水平辐合强度的概率密度分布

Fig. 8 Probability density of the horizontal convergence intensity below 2 km for precipitation events in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023-2024

强度要大于山区,可能与平原地区雷暴大风型对流触发区域分布较集中有关(陈明轩等,2017;李艳等,2022)。

利用天气雷达组合反射率因子数据,根据对流触发降水事件判别方法,提取出风廓线雷达组网所有三角形在2023—2024年4—9月对流触发事件共1100次。通过风廓线雷达组网的每个三角形区域范围与天气雷达时空匹配后,在地面气象观测站统计的763次降水事件中,有552次符合判别指标,属于对流触发降水,其余211次不属于对流性降水,故而对流触发信号判别指标的准确率为72.3%,误报率27.7%。其中每个三角形(剔除钝角和面积较小的三角形 T_9 和 T_{11})对流触发降水的准确率如图9所示。

进一步地,将京津冀地区划分为5个区域(北京、天津、河北北部、河北中部和河北南部),得到每个区域对流触发前30 min内2 km以下水平散度、相对涡度、垂直速度以及水平辐合强度的平均值统计结果(表1)。

在天津地区,筛选出降水事件92次,组网反演的平均水平散度值达到 $-5.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,水平辐合强度为 $133.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,识别准确率最高,可达79.5%;在北京地区,筛选出降水事件228次,水平散度和水平辐合强度分别为 $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $122.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,剔除 T_9 和 T_{11} 后,识别准确率为74.0%;河北北部虽然识别准确率为67.1%,但水平散度和水平辐合强度分别为 $-3.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $164.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,这可能与河北北部平原上空低层

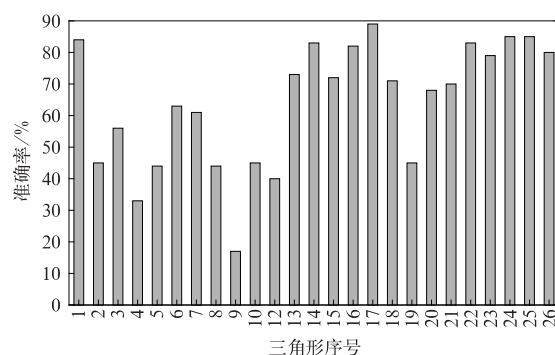


图9 2023—2024年4—9月京津冀地区风廓线雷达组网对流触发信号识别准确率

Fig. 9 Accuracy of convective initiation signal identification by wind profiler radar network in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023-2024

表 1 2023—2024 年 4—9 月对流触发前 30 min 内京津冀不同区域 2 km 以下水平散度、相对涡度和垂直速度及水平辐合强度平均值

Table 1 Mean values of horizontal divergence, relative vorticity, vertical velocity below 2 km, and horizontal convergence intensity in various areas during 30 min before convection triggering in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023—2024

区域	水平散度/ (10^{-5} s^{-1})	相对涡度/ (10^{-5} s^{-1})	垂直速度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)	水平辐合强度 /(10^{-5} s^{-1})	降水事件 数量/次	准确率/%
北京	-2.5	1.9	-1.0	122.9	68	74.0
天津	-5.9	1.3	-1.5	133.1	28	79.5
河北北部	-3.7	3.9	-0.7	164.8	54	67.1
河北中部	-2.3	2.6	-0.5	154.6	38	72.2
河北南部	-1.7	2.9	-0.2	234.2	40	61.1

的辐合和气旋性环流有助于形成强劲的上升气流,促进雷暴下山增强有关;在河北中部和南部识别准确率分别为 72.2%和61.1%,可能与该地区的弱辐合上升运动有关。正如前文所述,复杂地形条件(如三角形 T_1 、 T_2)和较大三角形角度(如三角形 T_7)均会增加水平散度和水平辐合强度指标计算的不确定性,进而影响太行山区、燕山山区等地区动力场精细结构演变特征分析和对流触发信号判别。未来,需要将这些区域的测风激光雷达组网资料融合进来,进行风廓线雷达和测风激光雷达的协同组网,以提高复杂地形区域低层大气动力廓线的反演精度。

3 结 论

本研究基于京津冀地区风廓线雷达中尺度网提供的高时空分辨率风场数据,通过构建包含 26 个三角形的中尺度组网方案,反演了 2023—2024 年 4—9 月 4 km 以下的水平散度、相对涡度和垂直速度等关键动力参数廓线,并结合水平辐合强度构建了对流触发信号判别指标,揭示了京津冀地区降水前大气动力场精细结构演变特征。主要结论如下:

(1)将高时空分辨率的水平散度和垂直速度反演结果应用于 2024 年 7 月 1 日凌晨京津冀地区一次对流天气过程的分析,发现风廓线雷达中尺度网可以精细地捕捉到对流触发前 120 min 低层辐合、高层辐散的特征。

(2)区域平均降水量与对流层中低层的水平散度(相对涡度和垂直速度)整体上存在正(负)滞后相关性。低层辐合大约在降水发生前 60 min 被观测到,降水发生前 30 min 强辐合信号出现频率约为 40%,在接近降水发生时,强辐合信号出现频率增加至 60%。

(3)将 30 min 内水平辐合强度持续大于 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 作为对流是否触发的判别指标,并筛选出京津冀地区暖季期间共 763 次降水事件,结果表明该指标对降水事件的识别准确率达到 72.3%。

虽然本研究定量分析了对流触发前风廓线雷达中尺度网反演的大气动力参数时空演变特征,但降水前的大气热力及水汽条件是对流天气触发的重要要素,未来可利用温湿廓线资料探究热力结构对对流天气触发的影响机制。

参考文献

- 蔡雪薇,湛芸,沈新勇,等,2019. 冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J]. 气象,45(5):621-631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2019. Cause analysis of different types of severe convective weather under cold vortex background[J]. Meteor Mon, 45(5):621-631(in Chinese).
- 曹林兮,吴梦雯,罗亚丽,等,2024. 苏沪城市群区域出梅后期对流初生客观识别方法及其时空分布特征[J]. 气象学报,82(3):275-288. Cao L X, Wu M W, Luo Y L, et al, 2024. An objective algorithm for identification of post-Meiyu convection initiation and its spatiotemporal distribution over the urban agglomeration of Jiangsu and Shanghai[J]. Acta Meteor Sin, 82(3):275-288(in Chinese).
- 陈明轩,肖现,高峰,2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J]. 大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5):897-917(in Chinese).
- 陈泽,田玉芳,吕达仁,2020. 北京 MST 雷达功率谱密度处理算法改进[J]. 应用气象学报,31(6):694-705. Chen Z, Tian Y F, Lü D R, 2020. Improving the processing algorithm of Beijing MST radar power spectral density data[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6):694-705(in Chinese).
- 崔新艳,陈明轩,秦睿,等,2021. 对流初生机理的研究进展[J]. 气象,47(11):1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2021.

- Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon, 47(11):1297-1318(in Chinese).
- 崔一峰, 1989. 计算散度的三点法比较及订正新方案[J]. 气象, 15(6):15-20. Cui Y F, 1989. Comparison among varieties of trilaterations applied to divergence calculation and relative correction scheme[J]. Meteor Mon, 15(6):15-20(in Chinese).
- 段宇辉, 孙云, 刘昊野, 等, 2025. 一次华北暖区暴雨的边界层环境条件分析[J]. 暴雨灾害, 44(2):156-166. Duan Y H, Sun Y, Liu H Y, et al, 2025. Analysis of boundary layer environment conditions during a warm-sector rainstorm in North China[J]. Torr Rain Dis, 44(2):156-166(in Chinese).
- 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等, 2017. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象, 43(5):528-539. Fu J L, Ma X K, Chen T, et al, 2017. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China[J]. Meteor Mon, 43(5):528-539(in Chinese).
- 郭建平, 刘博铭, 郭晓冉, 等, 2021. 风廓线雷达组网观测新型应用研究进展[J]. 气象科技进展, 11(2):5-12, 51. Guo J P, Liu B M, Guo X R, et al, 2021. Research progress on new applications of networked observation of wind profile radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(2):5-12, 51(in Chinese).
- 侯淑梅, 王秀明, 尉英华, 等, 2018. 山东省初秋一次大范围强对流过程落区和抬升触发机制分析[J]. 气象, 44(1):80-92. Hou S M, Wang X M, Wei Y H, et al, 2018. Analysis of an extensive severe convection falling area and lifting trigger mechanism in early autumn at Shandong Province[J]. Meteor Mon, 44(1):80-92(in Chinese).
- 黄明, 孙建华, 张元春, 等, 2024. 华北地区暖季雷暴大风对流系统的触发、组织类型及环境条件[J]. 中国科学:地球科学, 54(9):2929-2947. Huang Y, Sun J H, Zhang Y C, et al, 2024. Initiation, organizational modes and environmental conditions of severe convective wind events during the warm season over North China[J]. Sci China Earth Sci, 54(9):2929-2947(in Chinese).
- 雷蕾, 孙继松, 何娜, 等, 2017. “7·20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J]. 气象学报, 75(5):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(5):685-699(in Chinese).
- 李超, 王贺, 付真真, 等, 2024. 河北“23·7”特大暴雨过程的多尺度特征分析[J]. 气候与环境研究, 29(4):443-456. Li C, Wang H, Fu Z Z, et al, 2024. Multi-scale characteristics of the torrential rainfall in Hebei Province in July 2023[J]. Climatic Environ Res, 29(4):443-456(in Chinese).
- 李青春, 程丛兰, 全继萍, 等, 2022. 夏季两次不同强度暴雨过程的低空急流特征及其作用对比分析[J]. 气象, 48(11):1384-1401. Li Q C, Cheng C L, Quan J P, et al, 2022. Comparison of characteristics and effects about low-level jet in two rainstorm processes with different intensities in summer[J]. Meteor Mon, 48(11):1384-1401(in Chinese).
- 李艳, 王玉, 陈鲜艳, 2022. 太行山地形影响其东麓强对流系统触发、发展、移动路径的个例分析[J]. 地球科学进展, 37(5):472-483. Li Y, Wang Y, Chen X Y, 2022. Influence of the Taihang mountains on the initiation, development, and track of a convective precipitation system[J]. Adv Earth Sci, 37(5):472-483(in Chinese).
- 李志楠, 李廷福, 2000. 北京地区一次强对流大暴雨的环境条件及动力触发机制分析[J]. 应用气象学报, 11(3):304-311. Li Z N, Li T F, 2000. Analysis on the environmental conditions and dynamic trigger mechanism of a severe convective rainstorm in Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 11(3):304-311(in Chinese).
- 梁钊明, 高守亭, 王东海, 等, 2014. 京津冀地区与海风锋相互作用的对流系统的发展预判分析[J]. 气象学报, 72(1):116-132. Liang Z M, Gao S T, Wang D H, et al, 2014. Analysis of the development prognosis of the convective systems interacting with sea breeze front in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Acta Meteor Sin, 72(1):116-132(in Chinese).
- 田玉芳, 吕达仁, 2016. 北京 MST 雷达探测中间层-低热层观测结果初步分析[J]. 地球物理学报, 59(2):440-452. Tian Y F, Lü D R, 2016. Preliminary analysis of Beijing MST radar observation results in the mesosphere-lower thermosphere[J]. Chin J Geophys, 59(2):440-452(in Chinese).
- 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]. Chin J Atmos Sci, 39(1):100-124(in Chinese).
- 许敏, 沈芳, 刘璇, 等, 2022. 京津冀“7·5”强对流天气形成的环境条件及中尺度特征[J]. 干旱气象, 40(6):993-1002. Xu M, Shen F, Liu X, et al, 2022. Environmental conditions and mesoscale characteristics of severe convective weather in Beijing-Tianjin-Hebei on 5 July 2021[J]. J Arid Meteor, 40(6):993-1002(in Chinese).
- 徐姝, 易笑园, 熊明明, 等, 2024. 华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J]. 气象, 50(2):181-194. Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al, 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple β -meso scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China[J]. Meteor Mon, 50(2):181-194(in Chinese).
- 杨晓亮, 杨敏, 金晓青, 等, 2024. “23·7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 43(1):1-12. Yang X L, Yang M, Jin X Q, et al, 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023[J]. Torr Rain Dis, 43(1):1-12(in Chinese).
- 姚秀萍, 黄逸飞, 包晓红, 等, 2024. “23·7”华北极端强降水特征和水汽条件研究[J]. 气象学报, 82(5):585-599. Yao X P, Huang Y F, Bao X H, et al, 2024. Characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and its water vapor supply[J]. Acta Meteor Sin, 82(5):585-599(in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象,

- 38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11):1313-1329(in Chinese).
- 张江涛,何丽华,李江波,等,2023. 河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 大气科学学报,46(6):884-903. Zhang J T, He L H, Li J B, et al, 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23. 7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Trans Atmos Sci, 46(6):884-903(in Chinese).
- 张夕迪,胡艺,张芳,等,2023. 华北地区两次低涡暴雨过程降水特征和成因对比分析[J]. 大气科学,47(5):1593-1610. Zhang X D, Hu Y, Zhang F, et al, 2023. Comparative study of the characteristics and causes of two low-vortex heavy rain events in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5):1593-1610(in Chinese).
- 郑永光,周康辉,盛杰,等,2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报,26(6):641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6):641-657(in Chinese).
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007. 天气学原理和方法[M]. 4 版. 北京:气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Synoptic Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Guo X R, Guo J P, Zhang D L, et al, 2023. Vertical divergence profiles as detected by two wind-profiler mesonets over East China: implications for nowcasting convective storms[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 149(754):1629-1649.
- Huang Y, Sun J H, Zhang Y C, et al, 2024. Initiation, organizational modes and environmental conditions of severe convective wind events during the warm season over North China[J]. Sci China Earth Sci, 67(9):2876-2894.
- Kingsmill D E, 1995. Convection initiation associated with a sea-breeze front, a gust front, and their collision[J]. Mon Wea Rev, 123(10):2913-2933.
- Solanki R, Guo J P, Li J, et al, 2021. Atmospheric-boundary-layer-height variation over mountainous and urban sites in Beijing as derived from radar wind-profiler measurements[J]. Bound-Lay Meteor, 181(1):125-144.

(本文责编:张芳)