京津冀地区风廓线雷达组网的对流触发信号判 别*

3	杨荣芳 ^{1,2,3} 郭建平 ⁴ 孔凡超 ⁵ 张震 ⁴ 郭晓冉 ⁴ 单呈峰 ⁶ 邓剑波 ⁷ 孟德利 ^{1,4}						
4	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						
5	2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021						
6	3 河北省气象技术装备中心,石家庄 050021						
7	4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081						
8	5 河北省气象台,050021						
9	6 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044						
10	7 湖南省气象科学研究所,410118						
11	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 4km 以下关键动						
12	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						
13	的垂直上升运动特征。区域平均降水量与对流层中低层的辐合和上升运动整体上存在正滞后相关性。降水前 30 min						
14	内,水平散度小于-5×10 ⁻⁵ 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						
15	发生。可将 30 min 内水平辐合强度持续大于 50×10 ⁻⁵ 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,						
16	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。						
17	关键词: 风廓线雷达,对流触发, 辐合上升, 京津冀地区						
18	Observational analysis of precursor signals from the radar wind profiler						
19	mesoscale network in Beijing-Tianjin-Hebei region						
20	Yang Rongfang ^{1,2,3} Guo Jianping ⁴ Kong Fanchao ⁵ Zhang Zhen ⁴ Guo Xiaoran ⁴ Shan Yufeng ⁶						
21	Deng Jianbo ⁷ Meng Deli ^{1,4}						
22	1 China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area, Hebei Province 071800						
23 24	2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021						
24 25	3 Hebei Meteorological Technology and Equipment Center, Shijiazhuang 050021 4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081						
26	5 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021						
27	6 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044						
28	7 Hunan Meteorological Research Institute, Changsha 410118						
29	Abstract: In this study, we analyzed the evolution of the dynamical field before the trigger of convection						
30	by using the dynamical parameter profiles below 4 km inverted from the radar wind profiler (RWP)						
31	mesoscale network in the warm season (April-September) of 2023-2024. The results show that, before the						
32	trigger convection, the dynamical field is characterized by a vertical upward motion configuration with						
33	low-level convergence and high-level divergence. Results show the presence of positive time-lag						
34	correlations between area averaged rainfall rates and convergence in the lower to mid-troposphere. During						
35	the 30 min before precipitation, horizontal divergence is less than -5×10^{-5} s ⁻¹ , with the converging thickness						
36	below 1 km deepens, meaning that the continuously enhanced convergent and upward motion favors the						
37	occurrence of convection. The horizontal convergence intensity sustained to be						
38	greater than $50 \times 10^{\circ}$ s ⁻¹ in the 30 minutes prior to precipitation is used as an indicator for the early signal						
39	of convection triggering. Among 763 precipitation events, 30% samples were randomly selected to test the						
40	signal discrimination index before convection triggered, and the accuracy rate of effective identification of						
41	precipitation events was 72.3% . This study develops a quantitative discrimination technique of convective 1						

流天气触发短临预警产品研制》(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

第一作者:杨荣芳,主要从事数据质控和实况产品研发,Email:464322028@qq.com

通信作者:孟德利,主要从事边界层热动力过程研究,Email:mengdeli15@mails.ucas.ac.cn

42 precursor signals from RWP mesoscale network, which provides an important reference for quantitatively

43 analyzing the early warning of strong convection in Beijing-Tianjin-Hebei region.

44 Key words: Radar wind profile; convective trigger; convergence and upward motion;
45 Beijing-Tianjin-Hebei region.

46 引言

47 京津冀地区近年强对流天气频发,对人民生产生活造成严重影响(郑永光等,2015)。许多学
48 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
49 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
50 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
51 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、
52 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
53 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,

54 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、天气雷达和
55 再分析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
56 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
57 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 58 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 59 60 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, 61 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 62 的大气水平风速、风向、垂直风速等三维风场信息。利用三个站点以上的风廓线雷达不同高度的水 63 平风场,可实时反演高时空分辨率的水平散度、垂直涡度、水平风切变和垂直速度等大气动力参数, 64 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, 65 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, 66 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 67 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、垂直涡 68 69 度和垂直速度场。

70 本研究基于地面站点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
71 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
72 特征,探究水平散度和垂直速度与降水的滞后相关性,并通过准确率指标评估对流触发信号判别指
73 标的可靠性。

74 1 数据和方法

75 1.1 数据



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

82 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
83 线雷达(图 1a)实时采样高度上的产品数据。风廓线雷达均为边界层风廓线雷达,其探测廓线的时
84 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
85 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)。

86 1.2 方法

76

77

78

79

87 1.2.1 水平散度和垂直涡度反演算法

首先采用对数一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 88 别,然后结合三倍标准差法对异常点进行判别与剔除(田玉芳和吕达仁,2016;陈泽等,2020), 89 90 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、垂直涡度、垂 直速度)数据,。风廓线雷达三角形组网反演水平散度和垂直涡度的基本方法是:根据某一三角形 91 3 个顶点测站位置(x_i , y_i)的经纬度(λ_i , φ_i) (i = 1,2,3)和地球平均半径(R),计算该三角形三个边 92 的分量(Δx_i , Δy_i) (i = 1,2,3);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 93 处三角形内的水平散度(D)和垂直涡度(ζ);遍历三角形组网,得到三角形中尺度网上空任意高 94 度处的水平散度和垂直涡度(崔一峰, 1989; Guo et al, 2023)。具体计算公式如下: 95

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

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

96 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97 的变化特征。

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

99 该方法可获取逐层的垂直速度,能够精密捕捉中尺度组网内的上升运动,为判断中尺度对流系

100 统的发生发展提供依据。

101 1.2.2 降水事件提取方法

102 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 103 对异常数据进行剔除(Guo et al, 2023)。首先,对于单个站点,发生降水事件的标准如下: (1) 104 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 2h 105 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 106 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 107 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 0.1 108 mm 判定: (2)两个区域降水事件的时间间隔为 2h 及以上; (3)每个区域降水事件开始时间与 109 结束时间之间发生降水的累计时间大于或等于 1h; (4)每个区域降水事件至少有 5 个以上的站点 110 出现1次以上的单个站点同时降水事件;(6)每个三角形区域组网反演的水平散度在3km以下无 111 缺测值、构建的水平辐合强度和对流触发信号判别指标(定义和计算方法见下文)在降水前 60 min 112 113 无缺测值。

114 1.2.3 对流触发信号判别指标

115 以水平辐合强度作为对流触发信号。首先,在探测高度上自下而上搜索辐合或辐散的连通域;
116 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
117 计算得到每条水平散度廓线对应的水平辐合强度(*DI*),计算公式如下:

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

118 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_{con}* 119 (*H_{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_{icon}*(*D<sub>j_{div}*)为
 120 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-1,
 121 反之取值为1。
</sub>

122 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
123 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,
124 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。

125 1.2.4 对流触发判别准确率

126 利用准确率(F)评估对流触发信号判别指标的可靠性:

$$F = \frac{k}{K} \times 100\% \tag{5}$$

127 利用漏报率(P)评估对流触发信号判别指标的错误率:

$$P = \frac{K - k}{K} \times 100\% \tag{6}$$

128 式中: k代表对流触发信号判别准确的数量, K为总样本量。

129 1.2.5 迟滞相关分析

130 皮尔逊相关系数 (r) 用于度量两个变量的线性相关程度,可用于分析不同量纲数据间的相关性。131 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:

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

132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(如133水平散度,单位为 s^{-1}), 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,单134位为 mm (6 min)⁻¹, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为P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

135 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136 形面积平均降水量进行了统计分析(Guo et al, 2023)。

137 1.2.6 对流触发降水事件判别方法

138 利用空间分辨率为 0.01°、逐 6min 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
139 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
140 射率因子平均值在 35dBz 以上(曹林兮等, 2024); (2) 三角形内组合反射率因子大于 35dBz 的
141 格点数大于 700; (3) 每一次对流降水事件的持续时间不小于 60min; (4) 两个对流降水事件的
142 时间间隔不小于 120min。

143 2 结果分析

144 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,
145 下同),500hPa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
146 空槽位于河套东部。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
147 力辐合上升作用明显,触发强对流天气。本研究将以此次过程为例,分析对流触发前的大气动力场
148 演变特征。



149

150 图 2 2024 年 7 月 1 日 08:00 500hPa 位势高度场 (蓝色等值线)、温度场 (红色等值线,单位: ℃)和风场 (风羽)

151 Fig. 2 Geopotential height (blue contour, unit: gpm), temperature (red contour, unit: °C) and wind field (barb) at 500hPa at 08:00 BT 1 July 2024

- 152 2.1 对流触发前边界层动力场演变特征
- 153



154

155

: 横坐标中 "0" 表示降水开始时刻,小士 0 表示降水前,大士 0 表示降水后, 卜同。

156

图 3 2024 年 7 月 1 日京津冀地区各三角形区域平均水平散度(填色)时间-高度演变

Fig. 3 Time-height envolution of the averaged divergence (colored) over the various triangle areas in Beijing-Tianjin-Hebei Region on 1 July
 2024

159 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 T₂₃、T₂₄和 T₂₆)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 T₀₇、T₀₈、T₂₀)表现为近地层的辐合上升和 3 km 处的辐散下沉运动特征。
162 此时近地层呈现较弱的南风和不明显的辐散,这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 T₀₁、T₀₂、T₀₃、T₁₆)同样为近地层至 2 km 高度上的持续强辐合上升运动、2~3
164 km 高度上的辐散下沉运动。

165 以三角形 T₂₃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;
166 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-5×10⁻⁵ s⁻¹, 2~
167 4 km 维持深层正涡度和强辐合,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
168 级,虽然垂直速度大于-0.1 Pa s⁻¹,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
169 加强了风场的水平旋转,在 1 km 高度附近处出现垂直涡度最大值(约为 3×10⁻⁴ s⁻¹),这种气旋式
170 结构也有利于对流组织的发展。

171 降水前,三角形 T₁₆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-2.0×10⁻⁴ s⁻¹,有利于对流组织的迅速增强。同时,三角形 T₀₁ 也很好地
 173 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。

174 为了探究进一步对流触发前关键动力参数变化规律,本文首先分析了2023-2024年4-9月的763

175 次降水事件发生前 120 min 内风廓线雷达中尺度网反演的动力关键参数垂直分布。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、垂直涡度为正值、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 60min 开始辐合运动增强,尤其是在降水前 30min 开始,散度小于-5.0×10⁻⁵
179 s⁻¹,且辐合厚度增加。对于垂直涡度和垂直速度(图 4b 和 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。



196 于对流触发或增强移入的对流系统。相比之下,三角形 T₀₈(海淀-延庆-霞云岭)中呈现出降水量与

197 水平散度相对较弱的相关性。这种较弱相关性可能与地形影响大有关,其中的海淀站位于山前,受

198 低层南风影响;延庆站位于山后盆地,夏季谷地可能是西风;霞云岭位于西部山区,和海淀之间的

199 海拔也相差很大。



201 图 5 2023-2024 年 4-9 月京津冀地区 (a~c) 平均降水量和 (a) 水平散度、 (b) 垂直涡度和 (c) 垂直速度的滞后相关系数及(d~f)三角
 202 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 envolution of (a - c) the time-lag correlation coefficient of between the average precipitation and (a) divergence (b)
 vorticity, and (c) vertical velocity respectively in Beijing-Tianjin-Hebei Region, and (d - f) the occurrence frequency of (d) strong
 convergence, (e) positive vorticity and (f) strong upward motion within the triangular areas in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September
 during 2023-2024

200

200

208 区域平均降水量与降水前垂直速度的时滞分析结果(图 5c)显示,2~4 km 高度上的上升运动
与区域平均降水量具有正的时滞相关性,尤其对于降水前 30 min,从提前 48 min 时到提前 12 min
负相关增强,相关系数从 0.22 变化到-0.40。对于三角形 T₀₃(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
214 角度也会增加三角形组网反演的水平散度、垂直涡度和垂直速度的不确定性。

215 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D≤-1.0×10⁴s⁻¹)发生的频率来量化上
217 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%,
219 这说明近地层的持续强辐合更有利对流触发(图 5a)。相比于西部山前区的三角形 T₀₆,东部平原
220 区的三角形 T₁₆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

221 的水平和垂直扰动(段宇辉等, 2025)。降水发生前 60 min 内强上升运动(w≤-0.2 Pa s⁻¹)出现
 222 频率如图 5f 所示,结果表明超过 50%的降水前 30 min 时 1~4 km 伴随着上升运动。

223 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 时的-0.4×10⁻⁵ s⁻¹ 到降水开始时刻-2.6×10⁻⁵ s⁻¹,水平散度变化率为-1.1×10⁻⁵ s⁻¹ (60 min)⁻¹。在 1~2 km 高度处,水平散度同样地表现为辐合加强,由前 120 min 时的-0.2×10⁻⁵ s⁻¹ 到降水开始时刻-1.0×10⁻⁵ s⁻¹,水平散度变化率为-0.4×10⁻⁵ s⁻¹ (60 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。

229 由不同高度的水平散度计算概率密度函数(PDF)分布后发现,水平散度呈现出近似正态分布
230 (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
231 处,辐散运动加强(图 6e 和图 6f)。





图 6 2023–2024 年 4–9 月京津冀地区(a)水平散度的时间序列,(b \sim 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 functions of horizontal divergence at different altitude intervals in Beijing-Tianjin-Hebei Region from April to September during 2023–2024.

239 2.3 对流触发信号判别指标特征

240 由前文可知,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),241 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

²³⁶ 基于上述统计分析,风廓线雷达反演出的水平散度和垂直运动场可以为研究降水前动力场的演

²³⁷ 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

²³⁸ 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动力关键参数精度的影响。

242 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
243 大,其值可达 50×10⁻⁵ 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
244 度值也表现为持续增加趋势。因此,可以将降水前 30 min 内水平辐合强度持续大于 50×10⁻⁵ s⁻¹ 作为
245 对流触发的判别指标。



260 其中三角形 T₀₁的水平散度为-7.9×10⁻⁵ s⁻¹,水平辐合强度为 274.2×10⁻⁵ s⁻¹,表明河北东北部山区是对
261 流天气触发的一个高发区。同时,对流触发前,平原地区水平辐合强度要大于山区,可能与平原地
262 区雷暴大风型对流触发前分布较集中有关(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,共提取出风廓线雷达组 263 网所有三角形在 2023-2024 年 4-9 月对流触发事件 1100 次。通过风廓线雷达组网的每个三角形 264 区域范围与天气雷达时空匹配后,在地面站统计的763个降水事件中,有552个降水事件符合判别 265 指标,属于对流触发降水,其余211个不属于对流性降水,故而对流触发预警指标的准确率为72.3%, 266 误报率 27.6%。其中每个三角形对流触发降水的准确率如图 9 所示。 267





进一步地,将京津冀地区划分为五个区域(北京、天津、河北北部、河北中部和河北南部), 272 得到每个区域 30 min 内 2 km 以下水平散度、垂直涡度、垂直速度,以及辐合强度的平均值统计结 273 果(表1)。 274

- 275 表 l 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、垂直涡度和垂直速度及辐合指标平均值
- 276 277

268 269

Table 1 Mean values of divergence, relative vorticity, vertical velocity below 2 km, and convergence index for each region during 30 min before convective triggering in Beijing-Tianjin-Hebei Region Region from April to September during 2023-2024

序号	三角形	水平散度/ (10 ⁻⁵ s ⁻¹)	垂直涡度/ (10 ⁻⁵ s ⁻¹)	垂直速度/ (Pa s ⁻¹)	辐合指标/ (10 ⁻⁵ s ⁻¹)	降水事件 数量/个	准确率/ %
1	北京	-2.5	1.9	-1.0	122.9	68	74.0
2	天津	-5.9	1.3	-1.5	133.1	28	79.5
3	河北北	-3.7	3.9	-0.7	164.8	54	67.1
4	河北中	-2.3	2.6	-0.5	154.6	38	72.2
5	河北南	-1.7	2.9	-0.2	234.2	40	61.1

在天津地区,筛选出降水事件 92 个,组网反演的平均水平散度值达到-5.9×10⁻⁵ s⁻¹,水平辐合 278 强度为 133.1×10⁻⁵ 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 个, 水平 279 散度和水平辐合强度分别为-2.5×10⁵ s⁻¹和 122.9×10⁵ s⁻¹, 剔除钝角和面积较小的三角形(T_{09} 和 T_{11}) 280 外,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 281 -3.7×10⁻⁵ s⁻¹ 和 164.8×10⁻⁵ s⁻¹,这可能与河北北部平原上空低层的辐合和气旋性环流有助于形成强劲 282 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 283 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 T₀₁、T₀₂)和较大三角 284 形角度(如三角形 T07)均会增加水平散度和辐合强度指标计算的不确定性,进而影响太行山区、 285 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 286 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 287 层大气动力廓线的反演精度。 288

289 3 结论

290 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
291 个三角形的中尺度组网方案,反演了 2023—2024 年 4—9 月 0.5~4.0 km 的水平散度、垂直涡度和垂
292 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
293 区降水前大气动力场精细结构演变特征。主要结论如下:

294 (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
 295 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
 296 合、高层辐散的特征。

297 (2)区域平均降水量与对流层中低层的水平散度(垂直涡度和垂直速度)整体上存在正(负)
298 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
299 率约为 40%,在接近降水发生时,强辐合信号出现频率增加到 60%。

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

302 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
 303 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,未来将利用温湿廓线资料探究热力结构
 304 对对流天气触发的影响机制。

305 参考文献

- 306 蔡雪薇, 谌芸, 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).
- **308** 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
- 309 X, Wu M W, Luo Y L, et al, 2024. An objective algorithm for identification of post-Meiyu convection initiation and its spatiotemporal distribution
- 310 over the urban agglomeration of Jiangsu and Shanghai[J]. Acta Meteor Sin, 82(3): 275-288 (in Chinese).

311 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).
- 314 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.
- 315 Improving the processing algorithm of Beijing MST radar power spectral density data[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6): 694-705 (in Chinese).
- 316 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
 317 advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon, 47(11): 1297-1318 (in Chinese).
- 318 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
 319 to divergence calculation and relative correction scheme[J]. Meteor Mon, 15(6): 15-20 (in Chinese).

320 段字辉, 孙云, 刘吴野, 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,
 321 2025. Analysis of boundary layer environment conditions during a warm-sector rainstorm in North China[J]. Torr Rain Dis, 44(2): 156-166 (in

- 322 Chinese).
- 323 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.
- 324 Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 Extreme Precipitation Event in North China[J]. Meter Mon, 43(5): 528-539 (in Chinese).
- 325 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).
- 328 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
- 329 M, Wei Y H, et al, 2018. Analysis of an extensive severe convection falling area and lifting trigger mechanism in early autumn at Shandong

- 330 province[J]. Meteor Mon, 44(1): 80-92 (in Chinese).
- 331 黄玥, 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, 67(9): 2876-2894 (in Chinese).
- 334 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).
- 337 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,
- 338 2024. Multi-scale characteristics of the torrential rainfall in Hebei Province in July 2023[J]. Climatic Environ Res, 29(4): 443-456 (in Chinese).
- 339 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).
- 342 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).
- 345 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).
- 348 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
- 349 S T, Wang D H, et al, 2014. Analysis of the development prognosis of the convective systems interacting with sea breeze front in the
- **350** Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Meteor Sin, 72(1): 116-132 (in Chinese).
- 351 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).
- 354 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 Xian, Chen
 355 Mingxuan, Gao Feng, et al, 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains
 356 under weak synoptic forcing[J]. Chin J Atmos Sci, 39(1): 100-124 (in Chinese).
- 357 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,
 358 2022. Environmental conditions and mesoscale characteristics of severe convective weather in Beijing-Tianjin-Hebei on 5 July 2021[J]. J Arid
 359 Meteor, 40(6): 993-1002 (in Chinese).
- 360 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).
- 363 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
 364 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
 365 2023[J]. Torr Rain Dis, 43(1): 1-12 (in Chinese).
- 366 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
- 367 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
 368 Chinese).
- 369 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
 370 event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329 (in Chinese).
- 371 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
- 373 Chinese).

- 374 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).
- 377 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,
- 378 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6): 641-657 (in379 Chinese).
- 579 Chinese)
- 380 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
- **381** Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 382 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
- 383 nowcasting convective storms[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 149(754): 1629-1649.
- 384 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.
- 385 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.
- 387