

荆浩, 亢妍妍, 吴宏议, 等, 2024. 北京“23·7”极端强降雨特征和成因分析[J]. 气象, 50(5): 616-629. Jing H, Kang Y Y, Wu H Y, et al, 2024. Characteristics and causes of the July 2023 extremely torrential rain in Beijing[J]. Meteor Mon, 50(5): 616-629 (in Chinese).

北京“23·7”极端强降雨特征和成因分析^{*}

荆 浩 亢妍妍 吴宏议 雷 蕾 郭 锐 赵 玮 于 波

北京市气象台, 北京 100097

提 要: 利用北京地区加密气象站、补盲的北京市规划和自然资源委员会雨量站、双偏振雷达、风廓线雷达、GPS 水汽等观测数据和 ERA5 再分析数据, 对北京“23·7”极端强降雨阶段性特征和成因进行了分析。结果表明: “23·7”极端强降雨累计降水量(331 mm)和单点最大降水量(1025 mm)均打破历史纪录, 最大雨强($126.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)排名历史第二位, 具有显著的极端性。强降雨可分为 5 个阶段, 其中第 II 和第 IV 阶段降水量分别占过程累计降水量的 37.1% 和 39.7%, 第 IV 阶段雨强更大, 对应急流更强, 高温、高湿特征也更明显。地形对降雨的增幅作用显著, 降水量在海拔 100~300 m 山区迅速增加, 极大值出现在海拔约 400 m 的山区, 第 II (第 IV) 阶段山区平均降水量和小时雨强分别是平原的 2.1(3.0)倍和 2.0(2.7)倍; 第 II 阶段主要为地形对急流的直接抬升, 第 IV 阶段为地形绕流辐合和直接抬升共同作用。7 月 31 日上午(第 IV 阶段)边界层急流出口区与低空急流入口区耦合导致低层上升运动增强, 促使西部山前 β 中尺度对流系统由块状发展成线状并有 γ 中尺度涡旋产生, 该 β 中尺度对流系统北上时形成短暂的列车效应, 引发了西部山区 8 个站次 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的极端短时强降雨。

关键词: “23·7”极端强降雨, 地形作用, 低空急流, 中尺度对流系统, γ 中尺度涡旋

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.012201

Characteristics and Causes of the July 2023 Extremely Torrential Rain in Beijing

JING Hao KANG Yanyan WU Hongyi LEI Lei GUO Rui ZHAO Wei YU Bo

Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100097

Abstract: Based on the data of automatic weather stations in Beijing region, complementary rain gauge stations of Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, dual-polarization radar and wind-profiling radar as well as the GPS data and ERA5 reanalysis data, we analyze the spatio-temporal characteristics, and causes of this July 2023 extremely torrential rain in Beijing. The results indicate that the accumulated precipitation and intensity of this event were significant, with an average accumulated precipitation of 331 mm and maximum precipitation 1025 mm at a single station, both of which broke historical records. The maximum hourly rainfall of $126.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ranked the second in history. This rainfall process can be divided into five stages, of which stage II and stage IV of the rainfall accounted for 37.1% and 39.7% of the total process, being the primary phases. During stage IV, the corresponding jet stream intensity got much stronger, and the characteristics of high temperature and high humidity were more obvious. Terrain had a significant impact on the increase in rainfall. The rainfall increased most rapidly in the region between 100—300 m above sea level, and the maximum value appeared near the areas approximately

^{*} 海河流域气象科技创新项目(HHXM202405)和北京市科技计划项目(Z221100005222012)共同资助

2023 年 10 月 24 日收稿; 2024 年 2 月 29 日收修定稿

第一作者: 荆浩, 主要从事灾害天气预测与研究. E-mail: Haoe.jing@gmail.com

通讯作者: 吴宏议, 主要从事预报服务和气象灾害风险评估研究. E-mail: Wuhy0414@163.com

at the altitude of 400 m. The average accumulated rainfall and maximum hourly rainfall in mountainous areas were 2.1 (3.0) times and 2.0 (2.7) times that of the plains during stage II (stage IV), respectively. Stage II was primarily influenced by the direct terrain lifting of low-level jet, while stage IV was characterized by the combined effect of terrain lifting and blocking convergence. On the morning of the 31 (stage IV), the coupling of the boundary layer convergence at the terminus and the low-level divergence at its entrance led strong ascending motions, promoting the massive β -MCS to develop into a linear shape accompanied by a meso- γ scale vortex. This β -MCS propagated northward along the western mountainous regions, forming a short train effect and triggering the short-time extremely severe rainfall over $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ at eight stations.

Key words: the July 2023 extremely torrential rain, terrain effect, low-level jet, mesoscale convective system, meso- γ scale vortex

引言

2023年7月29日至8月2日,北京市遭遇了历史罕见的强降雨(“23·7”极端强降雨),在山区引发严重的洪涝灾害及重大人员伤亡。全市累计平均降水量为331 mm,突破1961年有完整观测记录以来的历史极值。房山、门头沟、昌平、石景山、大兴、丰台、怀柔7个区出现特大暴雨,单点最大降水量1025.0 mm,为北京地区迄今为止仪器记录到的单站最大过程降水量。全市因灾死亡33人,因抢险救援牺牲5人,失踪18人;洪涝灾害共造成近129万人受灾,房屋倒塌5.9万间,严重损坏的房屋14.7万间,农作物受灾面积22.5万亩(1亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$);全市累计转移群众8.2万余人;此外,强降雨还对山区的电力、通信、交通和水利工程等基础设施破坏严重。

极端暴雨致灾性高,一直以来都是气象学家关注和研究的重点。北京以及华北地区历史上曾多次发生极端暴雨过程,如1963年的“63·8”海河流域暴雨、1975年的河南“75·8”特大暴雨、1996年的华北“96·8”特大暴雨、2012年的北京“7·21”特大暴雨和2016年的华北“7·20”特大暴雨等(丁一汇等,1978;江吉喜和项续康,1997;孙军等,2012;孙建华等,2013;冉令坤等,2014;符娇兰等,2017;雷蕾等,2017;赵思雄等,2018)。在大尺度环流方面,华北暴雨过程的主要影响形势有低涡型、暖式切变型、低槽冷锋型、台风与低槽(低涡)远距离相互作用型、低涡(登陆台风)与西风槽相互作用型、登陆台风北上受高压阻挡停滞型等(陶诗言,1980;丁一汇等,1980;周鸣盛,1993;孙建华等,2005;寿绍文,2019)。北京“23·7”极端强降雨主要和台风残涡北上受西太平

洋副热带高压(以下简称副高)阻挡停滞有关(杨舒楠等,2023;杨晓亮等,2023),同“75·8”形势场相似,但低涡环流明显偏北。

丰富的水汽供应对暴雨的发生发展有重要影响。华北地区夏季暴雨的水汽通道主要有3条,一是西南季风将孟加拉湾的水汽远距离输送到华北;二是东南急流将南海的潮湿空气经江淮流域输送到华北;三是副高南侧或西南侧与台风之间的东南急流将来自西太平洋的水汽输送到暴雨区(梁萍等,2007;廖晓农等,2013)。其中,台风东北侧急流对水汽的远距离输送诱发过多次极端暴雨(丛春华等,2011;徐洪雄等,2014;汪小康等,2022;李超等,2022)。就北京“23·7”过程而言,“杜苏芮”和“卡奴”双台风引导下的西南、东南两条水汽输送通道为华北特大暴雨提供了异常充沛的水汽(张芳华等,2023)。

北京位于太行山、燕山和华北平原的过渡地带,地形对北京强降雨也有着重要的影响。数值研究表明,太行山地形抬升作用导致的低层辐合和垂直环流的变化能够影响降雨的强度,阻挡作用减慢降水系统的移动速度并改变暴雨中心(闫冠华等,2015;王宇虹等,2015;林慧敏等,2023)。当偏东的低空急流遇到太行山阻挡时,易在山前引发强降雨(孙继松等,2015;符娇兰等,2017;雷蕾等,2017;Xia and Zhang,2019)。

短时强降水对暴雨过程贡献度很大,其发生发展与中尺度对流系统关系密切(赵玮等,2022;周晓敏等,2023),如在中尺度地形强迫和低空急流增强过程中,形成的中尺度辐合线或涡旋有利于中尺度对流系统(MCS)的触发、增强,MCS的后向传播、列车效应等在山区附近容易产生暴雨(Chen et al,

2012;陈明轩等,2013;刘璐等,2015;Zhong et al, 2015;栗晗等,2018;雷蕾等,2020)。

北京“23·7”极端强降雨具有持续时间长、累计降水量和雨强大、地形增幅明显等特点。尽管业务预报对此过程的总降水量和降雨落区把握较好,主观暴雨预报较模式结果也有明显提升,但对降水量、雨强的阶段性精细特征和地形增幅强度估计不足,所以有必要对这次历史罕见的特大暴雨进一步总结、分析,加深对“23·7”极端强降雨的认识和理解,为业务预报和更深入的科学研究提供参考。

1 数 据

本文所用数据为北京地区加密自动气象站、北京市规划和自然资源委员会(以下简称规自委)的雨量站数据;北京观象台的 L 波段探空、风廓线雷达、GPS 水汽、多波段双偏振雷达等探测数据;逐小时、空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 ERA5 再分析数据。

气象观测站是天气监测、预报、研究的基石。为保证“23·7”极端强降雨观测数据的科学、准确,本文对北京全市共 599 个气象观测站的逐时降水量进行质量控制,剔除异常值站 15 个、被洪水冲毁的站 12 个,剩余 572 个气象站资料可用。其中,相比位于北京西北部的延庆区气象站数量(74 个),西部的房山区(43 个)、门头沟区(45 个)和昌平区(46 个)气象站数量较少,且平原地区站点分布密集、山区稀疏,加之因道路阻断等原因,山区部分称重式雨量站因超过观测上限无法及时清理,一定程度上影响了观测极值。而北京市规自委在北京山区布设了 580 个翻斗式雨量站,多数位于较高海拔的山坡上,2020 年开始对山区地质灾害隐患点和附近降雨进行监测。因此,为有效弥补西部山区观测的不足,本文针对本次极端强降雨过程特点、观测站网布局特点和观测数据有效性,按照以气象部门的 572 个气象观测站为主,以集中在房山区、门头沟区和昌平区的 107 个规自委雨量站补盲(共 679 个站,图 1)的处理方法,经核验与质量控制,整合形成一套完整、准确的北京“23·7”极端强降雨逐小时雨量观测数据集。构建的新数据集中,山区站点数据更精密,山区与平原的站点分布更均匀,为更科学地分析精细化降雨特征、极端性和地形对降雨增幅作用等提供了数据支撑。

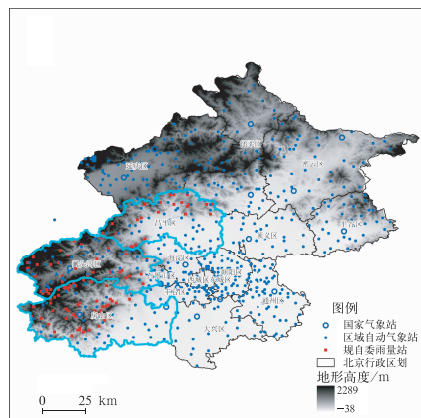


图 1 北京市地形高度(阴影)和观测站点分布(散点)

Fig. 1 Distribution of topography (shaded) and observation stations (dot) in Beijing

2 降雨特征及极端性

此次过程累计降水量、单点最大降水量均突破了历史极值。受极端强降雨影响,海河流域发生流域性特大洪水,永定河流域卢沟桥、大石河流域漫水桥等站最大洪峰流量为有实测记录以来的历史最高值(北京市人民政府门户网站, https://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202308/t20230809_3218873.html)。西部山区的极端短时强降雨,在 7 月 31 日 11:00 (北京时,下同)诱发了“永定河 2023 年第 1 号洪水”的形成(水利部官方网站, http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202307/t20230731_1676775.html)。

2.1 累计降水量特征及其极端性

2023 年 7 月 29 日 20:00 至 8 月 2 日 07:00,北京过程平均降水量 331 mm(只考虑气象站为 272.1 mm),占平均年降水量(551.3 mm,1991—2020 年 20 个国家级气象观测站平均)的 60%。累计降水量 400 mm 以上面积达 3526 km²(占全市约 21.5%),600 mm 以上达 1556 km²(占全市约 9.5%),800 mm 以上达 175 km²(图 2),且区域特征明显,位于西南部的房山区和门头沟区平均降水量位列全市各区前两位,其中房山区平均降水量为 627.1 mm,单点最大降水量 1025.0 mm;门头沟区平均降水量为 565.3 mm,单点最大降水量 1008.0 mm。

基于北京地区 20 个国家级气象观测站逐日雨量数据,对比 1961 年具有完整数据以来平均降水量

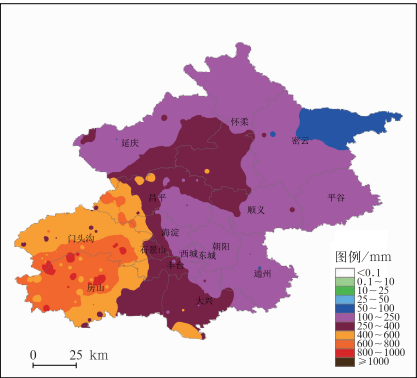


图 2 2023 年 7 月 29 日 20:00 至 8 月 2 日 07:00
北京“23·7”极端强降雨累计降水量分布

Fig.2 Distribution of accumulated precipitation of
the July 2023 extremely torrential rain in Beijing
from 20:00 BT 29 July to 07:00 BT 2 August 2023

超过 100 mm 的典型暴雨过程(表 1):“23·7”过程平均降水量为 283.6 mm,略高于“63·8”的 281.2 mm,明显高于 2016 年“7·20”的 231.7 mm 以及 2012 年“7·21”的 191.1 mm,为有完整记录以来平均降水量最大的过程;本次过程最大日降水量为 306.8 mm,仅比“7·20”少 0.4 mm,斋堂站的日降水量(214.9 mm)突破该站历史极值;国家级气象观测站中单站最大降水量为 772.2 mm(霞云岭),显著高于“63·8”的 512.8 mm(海淀),而所有雨量站中,最大为 1025.0 mm(规自委的金鸡台村北沟),气象站中最大为 879.4 mm(房山新村)。

通过对北京市气象档案馆的百年数据反查,北京地区最早有仪器记录到的强降雨发生在 1883 年 7 月 23—29 日,累计降水量为 510.3 mm(北京地磁观象台,中国最早使用近代气象仪器连续进行观测

表 1 1961 年以来北京国家级气象观测站平均降水量超过 100 mm 的暴雨过程
的平均降水量、单站累计最大降水量及最大日降水量

Table 1 The average accumulated precipitation, the maximum accumulated precipitation and
maximum daily precipitation at a single station during the extremely torrential rain with average
accumulated precipitation exceeding 100 mm at national meteorological stations since 1961

排名	起止时间	过程平均降水量/mm	单站累计最大降水量/mm	最大日降水量/mm
1	2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日	283.6	772.2(霞云岭)	306.8(霞云岭)
2	1963 年 8 月 4—9 日	281.2	512.8(海淀)	220.3(丰台)
3	2016 年 7 月 19—21 日	231.7	381.7(房山)	307.2(霞云岭)
4	2012 年 7 月 21—22 日	191.1	337.0(霞云岭)	289.0(霞云岭)
5	1973 年 7 月 1—3 日	158.1	201.4(门头沟)	107.7(昌平)
6	1994 年 7 月 12—13 日	150.8	305.1(平谷)	207.0(顺义)
7	1998 年 7 月 5—6 日	119.8	230.3(昌平)	149.2(门头沟)
8	1984 年 8 月 8—10 日	118.6	289.5(大兴)	192.1(通州)
9	1996 年 8 月 3—5 日	116.6	165.8(怀柔)	91.4(观象台)
10	2021 年 7 月 11—13 日	113.0	222.9(密云)	141.6(朝阳)
11	1975 年 7 月 29—30 日	108.2	205.3(通州)	136.9(通州)
12	2018 年 7 月 15—18 日	106.6	176.7(石景山)	131.0(怀柔)
13	1986 年 6 月 26—27 日	106.2	171.2(门头沟)	139.9(丰台)
14	1989 年 7 月 21—23 日	102.9	229.2(霞云岭)	194.2(霞云岭)
15	1964 年 8 月 1 日	101.6	183.8(昌平)	183.8(昌平)

的气象台站,位于今东直门附近),本次过程之前记录到的单站最大降水量为 1891 年 7 月 23 日的 609 mm(北京地磁观象台),而 2012 年北京“7·21”特大暴雨过程,最大为 541 mm(房山河北镇)。可见,“23·7”的单站最大降水量为北京地区迄今为止仪器记录到的单站最大过程降水量。

2.2 降雨强度特征及其极端性

从最大雨强的逐时演变(图 3)可见,83 h 中超过 20 mm·h⁻¹的有 61 h,占比 73%,超过 50 mm·h⁻¹的有 14 h,占比 17%。雨强最大值为规自委的

门头沟龙泉地区办事处(126.6 mm·h⁻¹),气象站中为门头沟定都阁(114.2 mm·h⁻¹)。

统计北京 2009—2023 年小时雨强数据(自 2009 年开始有小时雨量观测),此次过程最大雨强排名第二(图 4,若只考虑气象站则排名第五),略低于 2011 年 6 月 23 日石景山模式口的 128.9 mm·h⁻¹,但明显超过 2012 年“7·21”的最大雨强(平谷挂甲峪,100.3 mm·h⁻¹)。自 2009 年以来小时雨强超过 100 mm·h⁻¹共出现 26 个站次,本次过程中有 10 个站次(规自委雨量站 6 个,气象站 4 个),其中 8 个出现在门头沟区、房山区和丰台区(7 月 31 日

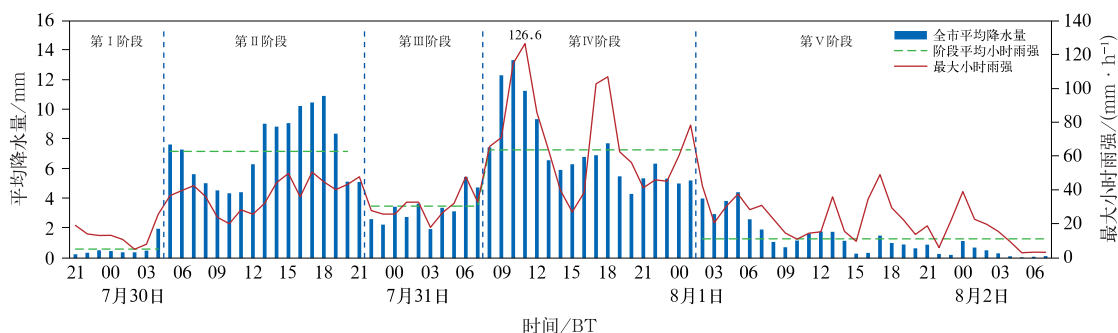


图 3 2023 年 7 月 29 日 20:00 至 8 月 2 日 07:00 北京全市平均降水量和最大小时雨强的逐时序列

Fig. 3 Average hourly precipitation and maximum hourly precipitation intensity in Beijing from 20:00 BT 29 July to 07:00 BT 2 August 2023

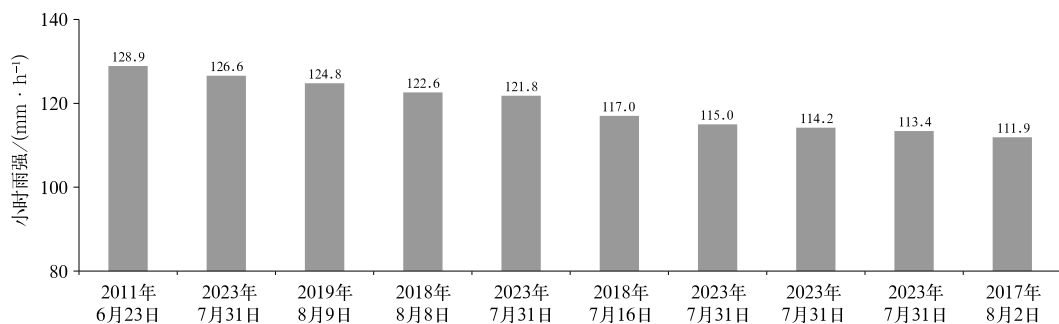


图 4 2009—2023 年北京前十名雨强排序

Fig. 4 The top 10 hourly precipitation intensities in Beijing from 2009 to 2023

09:00—11:00), 2 个出现在大兴区(31 日 16:00—18:00)。在历史前十的小时雨强排序中(图 4),本次过程有 5 个站次入选,单气象站历史前十排序中有 2 个入选,无论是否考虑规自委雨量站,都是雨强占比最多的过程。

虽然本次过程最大雨强极端,但相比 2012 年的“7·21”过程,北京城区未出现明显积水,原因一是“23·7”过程城区雨强较小,平均最大雨强为 $26.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,明显小于“7·21”过程的 $55.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,二是得益于“7·21”过程之后北京城区排水防涝能力的提升。

2.3 阶段性特征

此次过程降雨持续 83 h,存在鲜明的阶段性特征。根据降雨特点和天气系统,可分为 5 个阶段(图 5):

第 I 阶段(图 5a):29 日 20:00 至 30 日 04:00 (8 h),降雨分散,平均降水量为 4.9 mm (占比 1.5%);第 II 阶段(图 5b):30 日 04:00—21:00 (17 h),北京先后受到两条自东南向西北移动的螺旋雨带影响,强降雨范围显著增大,平均降水量为 122.9 mm (占比 37.1%);第 III 阶段(图 5c):30 日

21:00 至 31 日 07:00(10 h),平均降水量为 33.4 mm (占比 10.1%);第 IV 阶段(图 5d):31 日 07:00 至 8 月 1 日 01:00(18 h),强降雨范围再度变大,100 mm 以上的大暴雨落区沿山区附近向北推进,平均降水量为 131.4 mm (占比 39.7%);第 V 阶段(图 5e):8 月 1 日 01:00 至 2 日 07:00(30 h),持续时间长但较分散,降雨云团移动方向转为自西南向东北移动,平均降水量为 38.4 mm (占比 11.6%)。其中,第 II 和第 IV 阶段降水量约占过程总量的 77%,平均最大雨强超过了 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3),为降雨的主要阶段。

3 强降雨成因分析

第 II 和第 IV 阶段虽然过程累计降水量相当,但第 IV 阶段的最大雨强显著大于第 II 阶段,超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水都发生在第 IV 阶段(图 3)。本节将重点分析导致两个阶段雨强差异的原因。

3.1 环境场特征分析

北京“23·7”极端强降雨发生在台风杜苏芮残涡北上受高压阻挡停滞的环流背景下,高层辐散稳

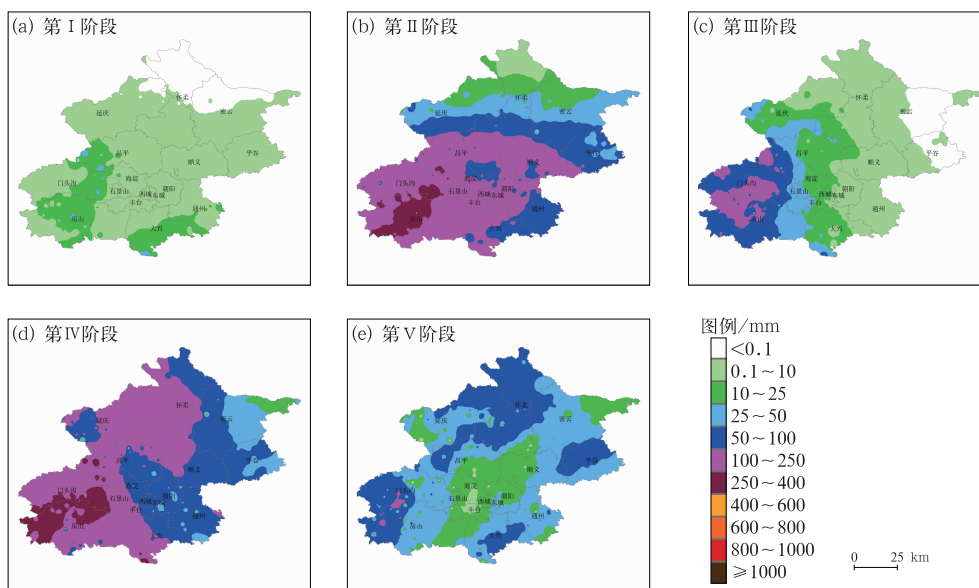


图5 “23·7”极端强降雨过程各阶段的累计降水量分布

Fig. 5 Distribution of accumulated precipitation in five stages during the process of the July 2023 extremely torrential rain

定维持,是典型的华北特大暴雨环流形势(杨舒楠等,2023;张芳华等,2023)。各降雨阶段与低涡系统的演变对应较好,其中第Ⅱ和Ⅳ阶段分别受低涡顶部倒槽和低涡东侧的暖式切变线影响。低空急流强度方面,第Ⅳ阶段随着副高加强西进,低空急流达到最强,2.5 km 高度附近风速最大约 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流厚度由第Ⅱ阶段的 2 km 增至 4 km(图 6a,6b);水汽方面,第Ⅰ~Ⅳ阶段北京地区的整层可降水量持续增加,由 29 日 08:00 的 60 mm 增至 31 日 20:00 的 77 mm,第Ⅳ阶段低层水汽通量达 $35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,明显高于第Ⅱ阶段(图略);不稳定层结方面,过程中对流有效位能(CAPE)始终为正值,虽然第Ⅰ、Ⅱ阶段随着降雨加强 CAPE 得到释放,但第Ⅲ、Ⅳ阶段随着低空急流加强、暖湿气流向北输送变强,北京低层假相当位温增大,CAPE 开始重建(图 6c),由第Ⅱ阶段后期的中性层结向第Ⅳ阶段的不稳定层结转变。

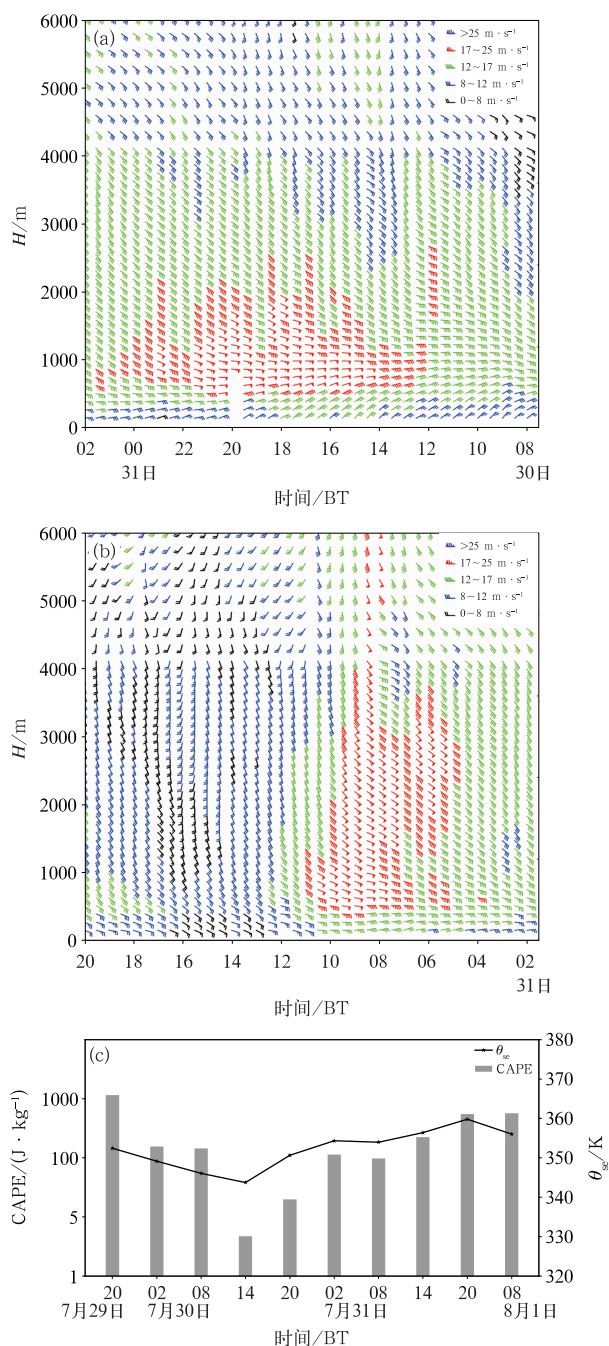
北京“23·7”过程和 2016 年的“7·20”过程均受低涡系统及低空急流影响。“7·20”中,925 hPa 最大风速为 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (探空资料),整层可降水量为 57~67 mm,CAPE 在降雨开始后快速释放,中期和后期始终为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与“7·20”相比,“23·7”虽然低空急流强度略小,但水汽条件、能量条件明显更好,且持续时间更长,因此,“23·7”过程的累计降水量和最大小时雨强要高于“7·20”。

3.2 地形的增幅作用

“23·7”过程累计降水量和最大小时雨强的大值区分布在北京西部山区和沿山一带(图略),其中第Ⅱ~Ⅳ阶段降水量占过程总降水量的 86.9%,地形对降雨的增幅作用显著。分析降水量与地形的纬向分布关系可更直观了解地形对降雨增幅的特点(符娇兰等,2017;杨浩等,2022)。计算 $39.6^{\circ} \sim 40.0^{\circ} \text{N}$ 区域(主要覆盖房山、门头沟及其以东地区)第Ⅱ~Ⅳ阶段降水量、小时雨强及其测站海拔高度的纬向变化(图 7a,7b),结果显示:

累计降水量自东向西开始增加的位置在距离山区以东约 15 km(116.4°E 附近)处,增加最快(曲线最陡阶段)区域在海拔 100~300 m 的浅山区,最大值出现在海拔 400 m 附近,而不是在海拔最高处(图 7a),向西累计降水量在波动中缓慢下降。该期间山区平均累计降水量为 577.8 mm,是平原(207.3 mm)的 2.8 倍,其中第Ⅱ、Ⅳ阶段山区分别是平原的 2.1 倍、3.0 倍。

降雨强度方面(图 7b),距离山区以东约 10 km 处最大小时雨强开始明显增强,在海拔 100~300 m 浅山区雨强增加最显著,超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强在海拔 200~400 m 的山区附近,最大值位于接近海拔 400 m 的山区,向西海拔超过 400 m 后,雨强从 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上迅速减小至 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。



注:8月1日02:00 缺测。

图 6 2023 年 7 月(a)30 日 08:00 至 31 日 02:00 和 (b)31 日 02:00—20:00 的北京站风廓线雷达的逐时风羽图,(c)29 日 20:00 至 8 月 1 日 08:00 北京站探空 CAPE 和 925 hPa 假相当位温 θ_{se}

Fig. 6 Hourly winds (barb) observed by Beijing wind-profiling radar from (a) 08:00 BT 30 to 02:00 BT 31 July and (b) 02:00 to 20:00 BT 31 July 2023, (c) CAPE and θ_{se} at Beijing Sounding Station from 20:00 BT 29 to 08:00 BT 1 August 2023

对逐小时山区最大小时雨强与平原最大小时雨强比值求平均(下同),该期间山区平均最大雨强是平原

的 2.7 倍,其中第 II 阶段山区是平原的 2.0 倍、第 IV 阶段为 2.7 倍。

分析地形对东风急流的强迫作用。从单点物理量垂直剖面看,垂直速度大值中心分别出现在第 II 阶段的 7 月 30 日傍晚和第 IV 阶段的 7 月 31 日上午(图 8a),与两个阶段最大小时雨强出现时段相对应,位置均在北京山区迎风坡上空。其中,第 II 阶段中 30 日 17:00 垂直上升运动深厚,中心位于 600 hPa 附近(图 8a)。800~400 hPa 水汽通量辐合主要由低涡倒槽造成,800 hPa 以下则为地形强迫(图 8c)。因此,第 II 阶段主要为中层较明显的低涡倒槽系统动力抬升叠加地形抬升;而第 IV 阶段中 31 日 10:00 垂直上升运动略浅薄,中心位于 850 hPa 附近,这源于在弱低涡切变线影响背景下,31 日上午随着北京地区边界层急流和低空急流的加强,山脉东坡的边界层急流出口区辐合和 700 hPa 风速 $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流入口区辐散发生耦合,在低层产生强烈上升运动(图 8b,8d),同时随着东南暖湿气流的加强,山前暖湿空气堆积更明显,出现相当位温大值中心,地形对暖湿气流的动力和热力强迫抬升作用较第 II 阶段明显加强(图 8d),因此为该阶段山区降雨增强提供了有利条件(孙军等,2012;符娇兰等,2017;雷蕾等,2017;汪小康等,2022)。

第 IV 阶段累计降水量和最大小时雨强在山区前 10~15 km 处开始增加,而第 II 阶段开始增加的位置靠近海拔 100 m 的浅山区(图 9a,9b)。进一步对比分析发现,第 IV 阶段低空盛行与北京西部山脉(呈西南—东北向)近于正交的偏东风,当气压梯度力、科氏力和摩擦力相平衡的东风气流移动到山区时,气流被阻挡、抬升而减速,此时气流受到的科氏力下降,不足以平衡气压梯度力从而转向与山脉平行的低气压区(David and Christopher, 1993; Kossmann and Sturman, 2003),于是偏东风转为东北风,在山前形成与山脉平行的阻滞气流,此现象在地面至 500 m 尤为明显,东风与阻滞的东北风在平原中部形成了中尺度辐合线。以基于睿图-睿思的 250 m 风场为例(杨璐等,2019),分析场可清楚看到此中尺度特征(图 9d)。对流移动到该辐合线附近加强,导致降雨在平原处开始明显增加。而第 II 阶段,山前边界层内为与山脉准平行的东北风,地形对风向偏转作用不明显(图 9c),直至在浅山区附近存在风速辐合,导致降雨在海拔 100 m 山区附近开始增加。因此,第 IV 阶段为地形对边界层急流和低空急流的

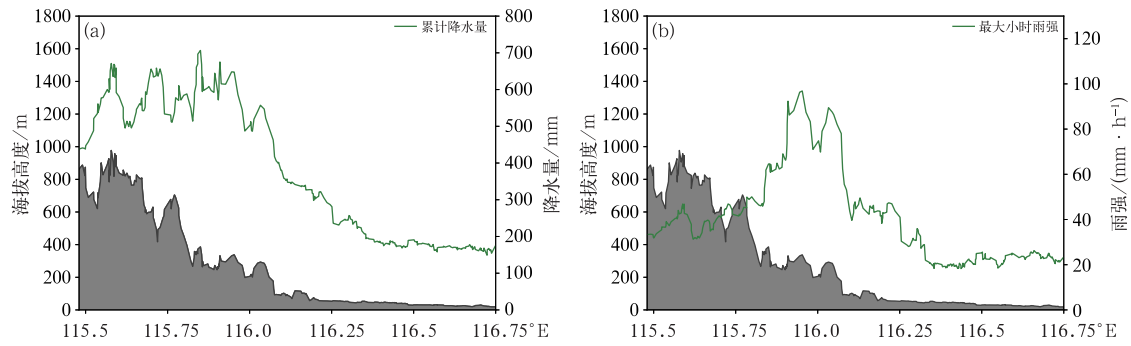
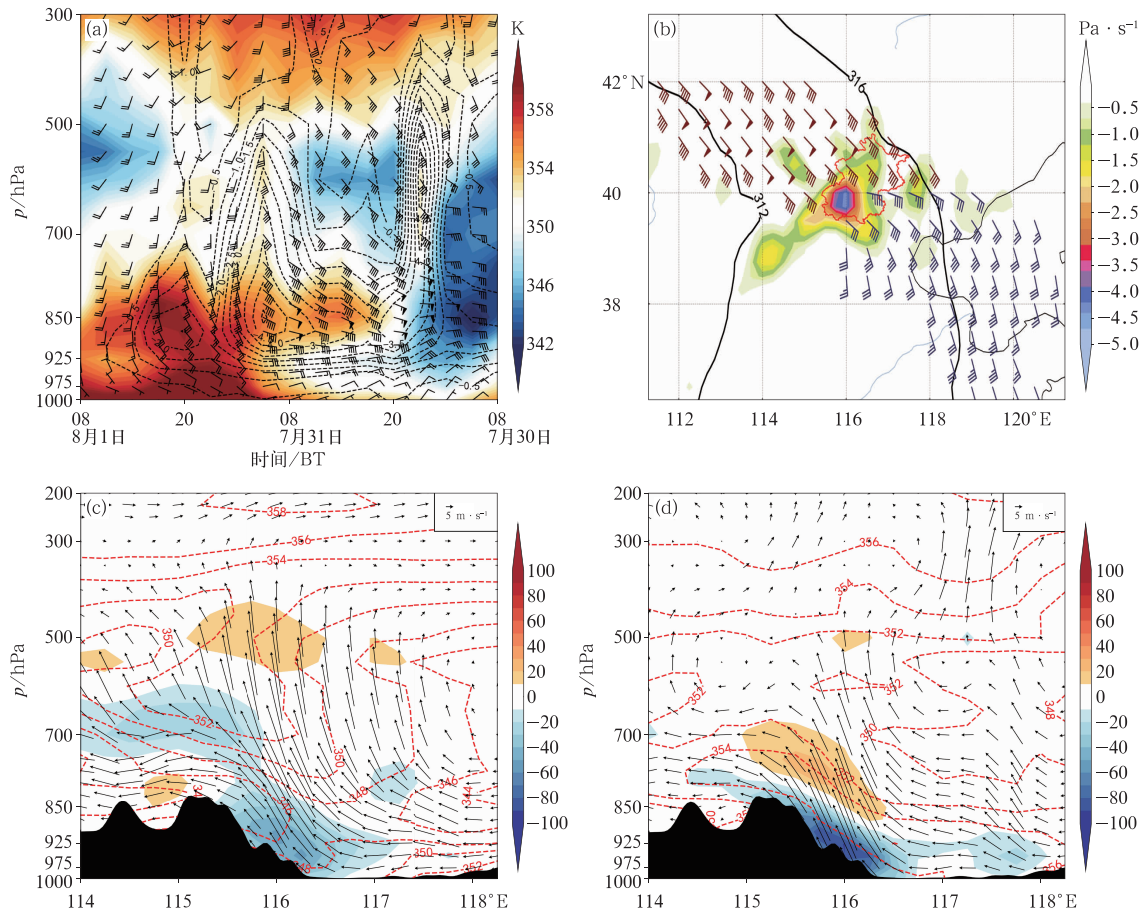


图7 北京“23·7”极端强降雨第Ⅱ~Ⅳ阶段 $39.6^{\circ}\sim 40.0^{\circ}\text{N}$ 区域

(a) 累计降水量和(b)最大小时雨强与测站所在海拔高度(阴影)的纬向变化

Fig. 7 Zonal variation of (a) accumulated precipitation and (b) maximum hourly precipitation intensity with altitude (shaded) of the stations in the region of $39.6^{\circ}\sim 40.0^{\circ}\text{N}$ from stage II to stage IV of the July 2023 extremely torrential rain in Beijing



注:黑色阴影为地形。

图8 2023年7月(a)30日08:00至8月1日08:00(40°N 、 116°E)的风场(风羽)、垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)和相当位温 θ_s (填色)的时间-高度演变,(b)31日10:00 700 hPa高度场(等值线,单位:dagpm)、700 hPa风速 $\geq 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风场(红色风羽)和950 hPa风速 $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风场(蓝色风羽)及垂直速度(填色),(c)30日17:00和(d)31日10:00沿 40°N 的 $u-10w$ 的合成环流(箭头)、水汽通量散度场(填色,单位: $10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和相当位温 θ_s (等值线,单位:K)的剖面

Fig. 8 (a) Time-height variation of wind (barb), vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) and θ_s (colored) at (40°N , 116°E) from 08:00 BT 30 July to 08:00 BT 1 August, (b) geopotential height at 700 hPa (contour, unit: dagpm), wind speed $\geq 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at 700 hPa (red barb), wind speed $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at 950 hPa (blue barb) and vertical speed (colored) at 10:00 BT 31 July, (c, d) cross-sections of $u-10w$ (vector), water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and θ_s (contour, unit: K) along 40°N at (c) 17:00 BT 30 July and (d) 10:00 BT 31 July 2023

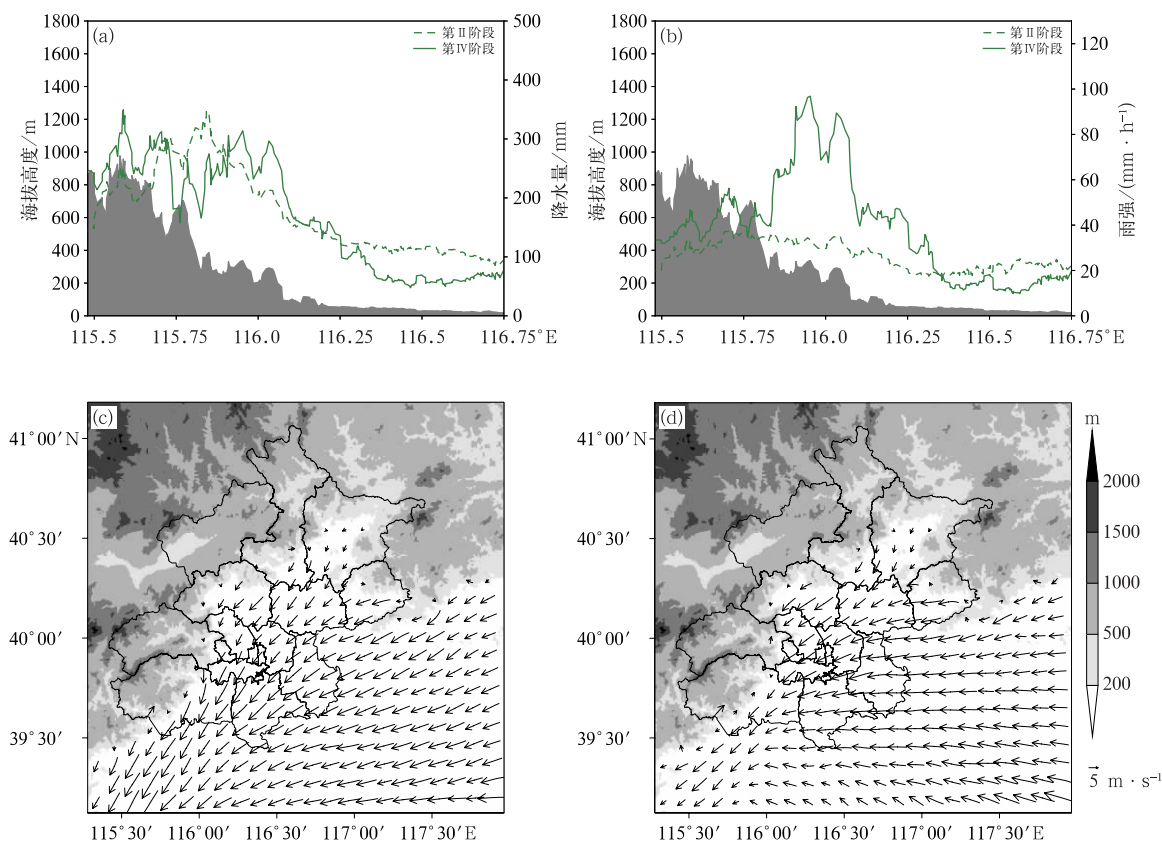


图 9 北京“23·7”极端强降雨第Ⅱ阶段和第Ⅳ阶段 39.6°~40.0°N 区域平均(a)累计降水量和(b)最大小时雨强与测站海拔高度(阴影)的纬向变化,2023 年 7 月(c)30 日 16:30(第Ⅱ阶段)和(d)31 日 09:30(第Ⅳ阶段)基于睿图-睿思的 250 m 高度风场分析场(风矢)与地形高度(阴影)

Fig. 9 Zonal variation of (a) accumulated precipitation and (b) maximum hourly precipitation intensity with altitude of the stations between 39.6°–40.0°N for stage II and stage IV of the July 2023 extremely torrential rain in Beijing, (c, d) wind analysis field based on Rmaps-Rise at altitude of 250 m (vector) with topography (shaded) at (c) 16:30 BT 30 July (stage II) and (d) 09:30 BT 31 July (stage IV) 2023

绕流辐合与直接抬升共同作用(图 10),而第Ⅱ阶段主要是地形对低空急流的直接抬升作用。

3.3 中尺度对流系统分析

北京“23·7”过程主要以层积混合云降水回波为主(符娇兰等,2023),强对流类型主要为短时强降雨,强回波影响处出现了弱雷电和 7 级左右短时大风,未观测到冰雹。强降雨的产生一般与 MCS 有关,本次过程中有多个低质心的 MCS 发生发展。其中第Ⅱ阶段对流影响范围较大、强度较弱,大部分地区组合反射率在 20~45 dBz;而第Ⅳ阶段对流性和局地性更强,组合反射率基本在 30~55 dBz,γ-MCS 非常活跃,31 日上午,迅速增强的 MCS 在西部山区引发了超过 100 mm·h⁻¹的短时强降雨。下面将进一步分析第Ⅳ阶段产生极端强降雨的 MCS 特征,并与第Ⅱ阶段进行对比。

从雷达回波特征可见(图 11),在第Ⅳ阶段,即 7 月 31 日 07:06 开始,中心强度≥45 dBz 的不规则 β-

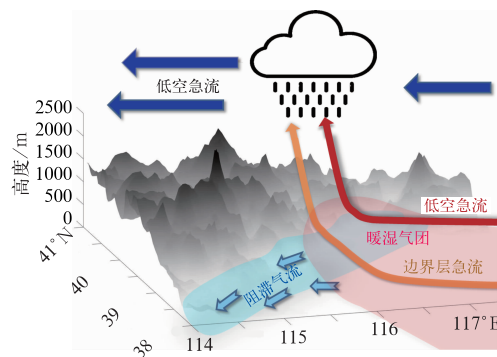


图 10 “23·7”极端强降雨第Ⅳ阶段地形影响降雨概念图

Fig. 10 Schematic diagram of topographic effect on rainfall in stage IV of the July 2023 extremely torrential rain

MCS从南部进入北京,向西北方向移动过程中逐渐加强, ≥ 45 dBz强回波发展成块状影响北京西南部,导致该区域降雨强度显著增强。在东风急流增强、增厚的背景下,09:30在块状 β -MCS的南侧即房山区东南部有 γ 中尺度线状回波生成,向北移动发展过程中逐渐与其北侧块状回波中心合并、增强,同时移速减慢,在10:00前后发展成为线状 β -MCS,于10:30左右达到最强,此时 ≥ 45 dBz的回波长约60 km, ≥ 50 dBz的强回波中心长约30 km。该线状的 β -MCS移动方向与其轴线平行,在沿北京西部山区北上时形成短暂的列车效应,引发该区域8个站次大于 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降雨,其中7个站次发生在31日10:00—11:00。

在 β -MCS增强的1 h内,回波中心强度增至55~60 dBz,从10:30雷达剖面看(图12),回波顶高增至15 km以上,但最强质心保持在3 km以下, ≥ 45 dBz的回波高度低于5.5 km,未超过 0°C 层(31日08:00北京探空显示0、 -10 、 -20°C 层高度分别为5.4、7.5、9.3 km),保持着塔状、低质心、深厚暖云降水回波特征;差分传播相移率(K_{DP})柱和差分反射率因子(Z_{DR})柱特征显著, $>1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的

K_{DP} 柱和 >1 dB的 Z_{DR} 柱伸展高度约6 km,表明该区域有强上升运动;结合反演的粒子类型分析,最强降雨阶段高空冰相粒子更深厚, -20°C 层之上以干雪为主,5~6 km雨夹雹和霰增多,与该区域1~2 dB的 Z_{DR} 值对应; K_{DP} 和 Z_{DR} 在 0°C 层以下显著增强, K_{DP} 最大约 $5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, Z_{DR} 最大值超过3.5 dB,表明大量冰相粒子的融化和雨滴碰并增长使得 0°C 层以下大雨滴数量增多、液态水含量增大,导致高降雨效率的短时强降雨出现。

另外,第IV阶段产生极端雨强的 β -MCS中存在浅薄的 γ 中尺度涡旋(简称MV)。北京S波段双偏振雷达分析可见,该MV于7月31日10:00在房山东北部浅山区附近生成,随后沿山区向北移动,10:30前后发展到最强阶段(图13),此时垂直伸展高度约3 km,1 km高度处直径约15 km、最大旋转速度约 $13\sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (距离雷达约40 km),达到弱中气旋标准(Andra Jr,1997),维持约1 h,11:00后在门头沟东北部减弱消失。此类MV可以显著增强风暴低空的上升气流,有利于产生极端强降雨(Trapp and Weisman,2003; Atkins and Laurent,2009; Xu et al,2015a;2015b;杨磊等,2023)。

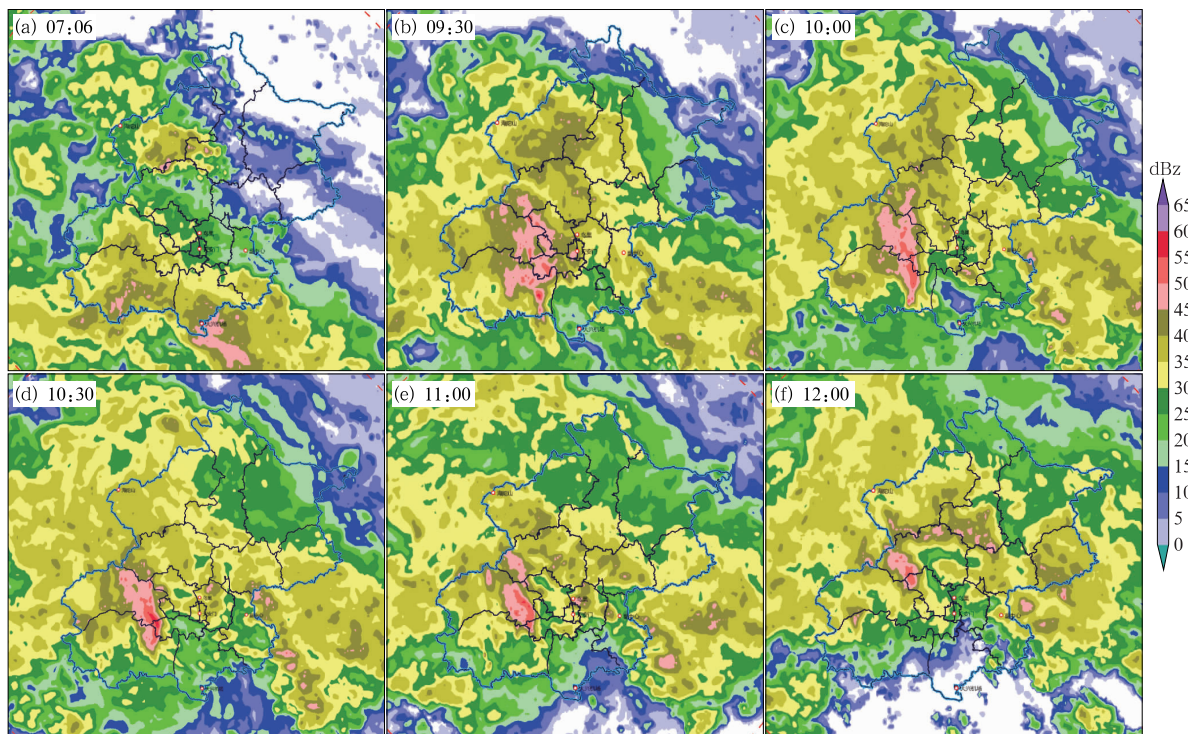


图11 2023年7月31日X波段组网雷达组合反射率

Fig. 11 Composite reflectivity from Beijing X-band radar networking on 31 July 2023

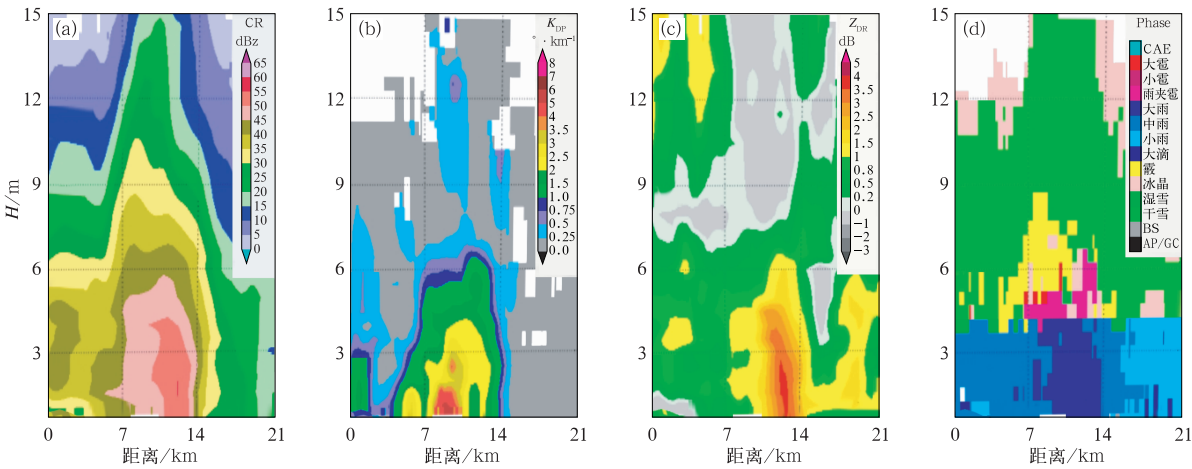


图 12 2023 年 7 月 31 日 10:30 北京 X 波段双偏振雷达组网沿(40.02°N、115.91°E)~(39.85°N、116.32°E)的剖面
(a)反射率因子 CR,(b)差分传播相移率 K_{DP} ,(c)差分反射率因子 Z_{DR} ,(d)反演的粒子类型

Fig. 12 Cross-section of Beijing X-band radar networking along
(40.02°N, 115.91°E)–(39.85°N, 116.32°E) at 10:30 BT 31 July 2023
(a) CR, (b) K_{DP} , (c) Z_{DR} , (d) retrieved particle type

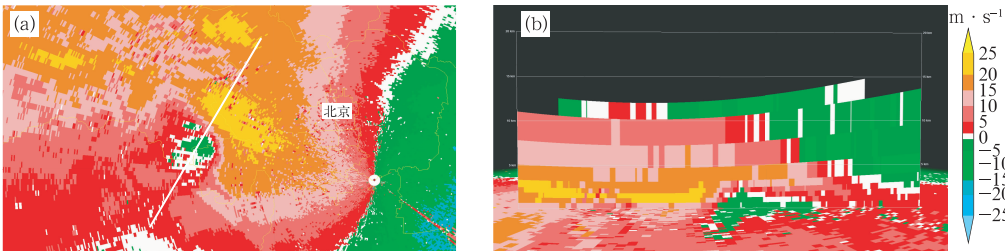


图 13 2023 年 7 月 31 日 10:30 北京 S 波段雷达 1.5°仰角的
(a)径向速度和(b)沿图 13a 中白线的径向速度剖面

Fig. 13 (a) Radial velocity at 1.5° elevation and (b) cross-section of radial velocity along
the white line in Fig. 13a from Beijing S-band radar at 10:30 BT 31 July 2023

第Ⅱ阶段的 7 月 30 日傍晚,北京西部山前有形态相似的线状 β -MCS 发展,引发了 17:00—21:00 连续 4 个时次雨强超过 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降雨,最大雨强为 17:00—18:00 的 $45\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。该

β -MCS 未出现爆发性增强现象,17:24 达到最强时回波中心各雷达特征参量较 7 月 31 日 10:30 的显著偏低(表 2),对应第Ⅱ阶段最大小时雨强较第Ⅳ阶段明显偏弱。

表 2 2023 年 7 月 30 日 17:24(第Ⅱ阶段)和 31 日 10:30(第Ⅳ阶段)双偏振雷达参量特征和雨强
Table 2 Dual polarization parameters and rainfall intensity at 17:24 BT 30 July (stage Ⅱ)
and 10:30 BT 31 July (stage Ⅳ) 2023

时间/BT	最大回波 强度/dBz	回波 顶高/km	最大 Z_{DR} /dB	最大 K_{DP} /($^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$)	$>1^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ K_{DP} 柱高度/km	γ 中涡旋	最大小时 雨强/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
7 月 30 日 17:24	45~50	15	2.5	1.5	2	无	45.0
7 月 31 日 10:30	55~60	10	5.0	3.5	6	有	126.6

4 结论与讨论

本文以北京地区加密自动气象站数据为主,利

用西部山区的规自委雨量站数据补盲,经有效评估和质量控制后,形成了一套较完整、准确的逐小时雨量数据集。新数据有效弥补西部山区观测的不足,为“23·7”极端强降雨精细化特征和极端性的分析

提供了更科学的数据支撑,也为北京此次灾情的调查、评估等工作提供了重要参考。同时还基于风廓线、双偏振雷达、探空、GPS水汽观测资料和 ERA5再分析等数据,着重对“23·7”过程的第Ⅱ和第Ⅳ阶段的降雨成因进行了初步研究。主要结论如下:

(1)“23·7”过程的累计降水量和最大小时雨强具有显著极端性。北京市累计平均降水量 331 mm,过程降水量历史排名第一;单点最大降水量 1025 mm,为北京地区迄今为止仪器记录到的单站最大过程降水量;最大小时雨强 $126.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,排名历史第二,同时也是排名前十的雨强中出现站次最多的过程。

(2)降雨持续时间长、阶段性特征明显。第Ⅱ和第Ⅳ阶段为过程主要降雨阶段,平均降水量分别为 122.9 mm(占比 37.1%)和 131.4 mm(占比 39.7%),二者累计降水量虽相当但降雨强度明显不同。第Ⅳ阶段 2.5 km 高度附近急流增强至 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流厚度增至 4 km,整层可降水量增至 70 mm 以上,低层假相当位温达 354 K 以上,动力条件和高温、高湿特征较第Ⅱ阶段进一步增强,降雨强度达到过程最强。

(3)山脉对低空暖湿急流的动力和热力强迫作用,导致降雨增幅明显。过程累计降水量和最大小时雨强在海拔 100~300 m 的山区增加最快,最大值出现在海拔 400 m 附近的山区,400 m 以上随着海拔高度的增加雨强迅速减小,而累计降水量变化较小。第Ⅱ~Ⅳ阶段山区的平均降水量和同时段平均最大小时雨强分别是平原地区的 2.8 倍和 2.7 倍,其中第Ⅱ阶段分别为 2.1 倍和 2.0 倍,第Ⅳ阶段分别为 3.0 倍和 2.7 倍。第Ⅱ阶段是地形对气流的直接抬升起主要作用,降雨开始增强的位置靠近海拔 100 m 的浅山区,而第Ⅳ阶段由地形的绕流辐合和直接抬升共同作用,导致降雨在山前 10~15 km 处开始增大。第Ⅳ阶段山脉东坡边界层急流出口区辐合和低空强急流入口区辐散发生耦合,导致低层上升运动增强,同时地形对暖湿急流的热力强迫更强,为山区降雨的增强提供了有利条件。

(4)强降雨主要由多个低回波质心的 MCS 引发。在双急流耦合引起低层上升运动加强的背景下,山前的 β -MCS 增强, $\geq 45 \text{ dBz}$ 回波由块状发展为线状,同时内部有 γ 中尺度涡旋产生,其厚度约 3 km,1 km 高度处最大直径约 15 km,持续约 1 h。块状 β -MCS 发展成线状时,最大回波顶高增至

15 km 以上, $>1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的 K_{DP} 柱和 $>1 \text{ dB}$ 的 Z_{DR} 柱伸展至 6 km, K_{DP} 和 Z_{DR} 在 0°C 层以下显著增强至 $5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 和 3.5 dB, 0°C 层以下大雨滴数量增多、液态水含量增高,有利于降雨效率的提高。31 日上午(第Ⅳ阶段),该线状 β -MCS 北上期间在西部山区形成短暂的列车效应,引发了 8 个站次超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降雨。

极端强降雨尤其是极端雨强的定时、定点、定量预报一直是科研和业务面临的共同挑战。对于本次过程,数值模式对天气尺度形势的预报较准确和稳定,模式可预报性较高,预报员在数值预报结果上有进一步的订正,但对强降雨的精细化落区和最大雨强的预报较实况仍有一定差距。通过本文研究,初步揭示了降雨阶段性特点以及两个主要阶段降雨差异的成因,结果为深入理解强降雨形成机制和预报提供了参考。但针对中小尺度地形影响短时暴雨的机制,包含 γ 中尺度涡旋的中尺度对流系统组织、增强机制,云物理降水效率以及极端强降雨的精细化预报等多个科学问题仍然不够清楚,有待日后开展深入探究。

致谢:感谢大兴区气象局李京南、北京市气象局洪波、张子曰、卢俐、沈玲玲提供数据支持。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,肖现,等,2013. 北京“7·21”暴雨雨团的发生和传播机理[J]. 气象学报,71(4):569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012[J]. Acta Meteor Sin, 71(4):569-592(in Chinese).
- 丛春华,陈联寿,雷小途,等,2011. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报,27(2):264-270. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al, 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall[J]. J Trop Meteor, 27(2):264-270(in Chinese).
- 丁一汇,蔡则怡,李吉顺,1978. 1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的研究[J]. 大气科学,2(4):276-289. Ding Y H, Cai Z Y, Li J S, 1978. A case study on the excessively severe rainstorm in Henan Province, early in August, 1975[J]. Sci Atmos Sin, 2(4):276-289(in Chinese).
- 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等,1980. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析[C]//暴雨及强对流天气的研究—中国科学院大气物理所集刊,第 9 号. 北京:科学出版社. Ding Y H, Li J S, Sun S Q, et al, 1980. Analysis of several types of weather systems affecting heavy rainfalls in North China[C]//Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Collected Papers of Institute of Atmospheric Physics, No. 9. Beijing: Science Press (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).
- 符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12): 1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1435-1450(in Chinese).
- 江吉喜, 项续康, 1997. “96·8”河北特大暴雨成因初探[J]. 气象, 23(7): 19-23. Jiang J X, Xiang X K, 1997. A primary study of the extreme rainfall event in early August 1996 over Hebei Province[J]. Meteor Mon, 23(7): 19-23(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).
- 雷蕾, 邢楠, 周璇, 等, 2020. 2018年北京“7·16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. 气象学报, 78(1): 1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 1-17(in Chinese).
- 李超, 崔春光, 徐慧燕, 等, 2022. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象, 48(12): 1497-1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al, 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(12): 1497-1511(in Chinese).
- 栗哈, 王新敏, 张霞, 等, 2018. 河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 44(9): 1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the North of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1136-1147(in Chinese).
- 梁萍, 何金海, 陈隆勋, 等, 2007. 华北夏季强降水的水汽来源[J]. 高原气象, 26(3): 460-465. Liang P, He J H, Chen L X, et al, 2007. Anomalous moisture sources for the severe precipitation over North China during summer[J]. Plateau Meteor, 26(3): 460-465(in Chinese).
- 廖晓农, 倪允琪, 何娜, 等, 2013. 导致“7·21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J]. 气象学报, 71(6): 997-1101. Liao X N, Ni Y Q, He N, et al, 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the “7·21” heavy rain case[J]. Acta Meteor Sin, 71(6): 997-1101(in Chinese).
- 林慧敏, 闵锦忠, 朱利剑, 等, 2023. 太行山地形在“7·19”华北持续性低涡暴雨中的作用[J]. 气象科学, 43(1): 46-58. Lin H M, Min J Z, Zhu L J, et al, 2023. The role of Taihang Mountain topography in “7·19” persistent low vortex rainstorm in North China[J]. J Meteor Sci, 43(1): 46-58(in Chinese).
- 刘璐, 冉令坤, 周玉淑, 等, 2015. 北京“7·21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析[J]. 大气科学, 39(3): 583-595. Liu L, Ran L K, Zhou Y S, et al, 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 39(3): 583-595(in Chinese).
- 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌, 2014. “7·21”暴雨过程动力因子分析和预报研究[J]. 大气科学, 38(1): 83-100. Ran L K, Qi Y B, Hao S C, 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 83-100(in Chinese).
- 寿绍文, 2019. 中国暴雨的天气学研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5): 450-463. Shou S W, 2019. Progress of synoptic studies for heavy rain in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5): 450-463(in Chinese).
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10): 1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1267-1277(in Chinese).
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等, 2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 10(3): 492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Climatic Environ Res, 10(3): 492-506(in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等, 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学, 37(3): 705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing Area on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 705-718(in Chinese).
- 孙继松, 雷蕾, 于波, 等, 2015. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 73(4): 609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 73(4): 609-623(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社. Tao S Y, 1980. Rainstorms in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 533-544(in Chinese).
- 王宇虹, 徐国强, 贾丽红, 等, 2015. 太行山对北京“7·21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J]. 气象, 41(4): 389-400. Wang Y H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2015. Numerical simulation analysis on impact of Taihang Mountain and vapor sensitivity on the 21 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 41(4): 389-400(in Chinese).
- 徐洪雄, 徐祥德, 张胜军, 等, 2014. 台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应及其对北京“7·21”暴雨的影响[J]. 大气科学, 38(3):

- 537-550. Xu H X, Xu X D, Zhang S J, et al, 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(3): 537-550 (in Chinese).
- 闫冠华, 李巧萍, 李瑞义, 2015. 太行山地形对华北暴雨影响的数值模拟试验[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 7(4): 351-358. Yan G H, Li Q P, Li R Y, 2015. Numerical simulation for terrain effects of Taihang Mountain on heavy rainfall over North China[J]. *J Nanjing Univ Informat Sci Technol (Nat Sci Ed)*, 7(4): 351-358 (in Chinese).
- 杨浩, 周文, 汪小康, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. *气象*, 48(5): 571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 571-579 (in Chinese).
- 杨磊, 郑永光, 袁子鹏, 等, 2023. 2019年8月16日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J]. *气象学报*, 81(1): 19-39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al, 2023. The low-level meso- γ -scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: formation, merging, and rain-producing mechanisms[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(1): 19-39 (in Chinese).
- 杨璐, 陈敏, 陈明轩, 等, 2019. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究[J]. *气象学报*, 77(2): 243-255. Yang L, Chen M, Chen M X, et al, 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in now-casting of severe convective weather[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(2): 243-255 (in Chinese).
- 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. *暴雨灾害*, 42(5): 508-520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al, 2023. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. *Torr Rain Dis*, 42(5): 508-520 (in Chinese).
- 杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等, 2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. *气象*, 49(12): 1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. *Meteor Mon*, 49(12): 1451-1467 (in Chinese).
- 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. *气象*, 49(12): 1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. *Meteor Mon*, 49(12): 1421-1434 (in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. *气象*, 44(3): 351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. *Meteor Mon*, 44(3): 351-360 (in Chinese).
- 赵玮, 郝翠, 曹洁, 等, 2022. 近40年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征[J]. *大气科学*, 46(5): 1167-1176. Zhao W, Hao C, Cao J, et al, 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(5): 1167-1176 (in Chinese).
- 周鸣盛, 1993. 我国北方50次区域性特大暴雨的环流分析[J]. *气象*, 19(7): 14-18. Zhou M S, 1993. The circulation analysis of regional heavy rainstorms in the north of China[J]. *Meteor Mon*, 19(7): 14-18 (in Chinese).
- 周晓敏, 田付友, 郑永光, 等, 2023. 中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J]. *气象*, 49(3): 267-278. Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rainstorm in China[J]. *Meteor Mon*, 49(3): 267-278 (in Chinese).
- Andra Jr D L, 1997. The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram[C]//28th Conference on Radar Meteorology. Austin: American Meteorological Society: 364-365.
- Atkins N T, Laurent M S, 2009. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 137(5): 1514-1532.
- 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]. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D20): D20115.
- David W C, Christopher D J, 1993. The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 32(11): 1669-1682.
- Kossmann M, Sturman A P, 2003. Pressure-driven channeling effects in bent valleys[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 42(1): 151-158.
- Trapp R J, Weisman M L, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: their genesis and implications[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2804-2823.
- Xia R D, Zhang D L, 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19-20 July 2016 along the Taihang Mountains in North China[J]. *Mon Wea Rev*, 147(11): 4199-4220.
- Xu X, Xue M, Wang Y, 2015a. The genesis of mesovortices within a real-data simulation of a bow echo system[J]. *J Atmos Sci*, 72(5): 1963-1986.
- Xu X, Xue M, Wang Y, 2015b. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the central United States: analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation[J]. *Mon Wea Rev*, 143(6): 2266-2290.
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al, 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(8): 3274-3291.

(本文责编:张芳)