

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).

“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^{*}

符娇兰 权婉晴 麦子 罗琪 陈涛 李晓兰
许先煌 朱文剑 华珊 韩旭卿

国家气象中心,北京 100081

提 要: 基于 ERA5 再分析资料、国家级和区域级地面气象观测、双偏振多普勒雷达、地面雨滴谱仪、闪电定位仪、风廓线雷达等多源观测资料,对“23·7”华北创纪录极端降水过程中雨强的精细化特征,导致极端降水的中尺度对流系统(MCS),极端降水的微物理特征及动力和热力条件进行了分析。结果表明:整个过程小时雨强表现出面弱点强的特点,局地小时、分钟级雨强具有极端性。雨强阶段性特征明显,2023 年 7 月 30 日 08:00 至 31 日 20:00(第二阶段)雨强最强,与多个 β -MCS 发展有关,并伴有后向传播及列车效应等中尺度过程,降水以中等直径、高浓度雨滴为主,具有一定的低浓度大粒子雨滴样本,属于海洋性与大陆性混合型降水,暖云碰并与冰晶聚合融化过程共存。7 月 29 日 08:00 至 30 日 08:00(第一阶段)和 7 月 31 日 20:00 至 8 月 2 日 08:00(第三阶段)雨强相对较小,对应于前者的 MCS 垂直伸展高度较低、强度不强,以暖云降水为主导,雨滴浓度高、直径中等,对应于后者的 MCS 发展强盛,但移动速度快,也具有海洋性与大陆性降水混合型降水特征。三个阶段的大气整层可降水量最大值均超过 70 mm,第一阶段天气尺度强迫强,对流有效位能(CAPE)在 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,MCS 发展高度相对较低;第二阶段后期天气尺度强迫有所减弱,但华北中南部对流不稳定能量再次重建,上游地区 CAPE 较第一阶段有所增大($600 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),导致极端降水的 MCS 发展为深厚湿对流系统,雨强明显增大;第三阶段天气尺度强迫明显减弱,低层偏南风脉动辐合和大的 CAPE 为 MCS 强烈发展提供了有利条件。

关键词: “23·7”特大暴雨,极端降水,雨强,中尺度对流系统,降水微物理特征,动力和热力条件

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.112701

Preliminary Study on the Refined Characteristics of Rainfall Intensity and Dynamic and Thermodynamic Conditions in the July 2023 Severe Torrential Rain in North China

FU Jiaolan QUAN Wanqing MAI Zi LUO Qi CHEN Tao LI Xiaolan
XU Xianhuang ZHU Wenjian HUA Shan HAN Xuqing

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the ERA5 reanalysis data and the multi-source observations such as ground national and regional automatic weather stations, dual polarization radar, ground raindrop spectrometer, lightning locator, wind-profiling radar, we analyze the refined characteristics of rainfall intensity, the mesoscale convective system (MCS) responsible for the extreme precipitation, the microphysical features as well as dynamic

^{*} 国家重点研发计划(2022YFC3003905)、国家自然科学基金项目(U2142214)、中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ007)和中国气象局暴雨精细化分析和预报青年创新团队专项共同资助

2023 年 10 月 17 日收稿; 2023 年 11 月 26 日收修定稿

第一作者:符娇兰,主要从事灾害性天气预报技术与机理研究,Email:bluelilfy@163.com

and thermodynamic conditions of the July 2023 extremely severe precipitation process in North China. The results indicate that the hourly rainfall intensity in this event was characterized by weak in most areas but strong at some stations, and the local hourly and minute-level rainfall intensities both reached the extremity level. The stage feature of the rainfall intensity was obvious, with the rainfall intensity being strongest in the second stage from 08:00 BT 30 to 20:00 BT 31 July. This was caused by several β -MCSs and accompanied by mesoscale processes such as backward propagation and train effect. The severe precipitation was mainly composed of high concentration raindrops with medium diameters, and had a certain amount of low-concentration large particle raindrop samples. Thus, this extreme rainfall event belonged to a mixed type with precipitation of oceanic and continental nature, in which warm clouds collided, coexisting with ice crystal aggregation and melting. In the first stage (from 08:00 BT 29 to 08:00 BT 30 July) and the third stage (from 20:00 BT 31 July to 08:00 BT 2 August) the rainfall intensity was relatively small. The former had a low vertical extension height and weak intensity of MCS, dominated by warm-cloud precipitation, and the raindrops had high concentrations and medium diameters. The MCS responding to the latter developed vigorously, but it moved fast. So, it also had the characteristics of mixed-type oceanic and continental precipitation. The maximum values of integrated precipitable water in the three stages all exceeded 70 mm. In the first stage, the synoptic scale forcing was strong, and the convective available potential energy (CAPE) was around $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. The vertical height of MCS was relatively low. In the second half period of the second stage, the synoptic scale forcing was weakened, but the unstable convective energy in the central and southern parts of North China was rebuilt again. The CAPE in the upstream region became increased compared to the value in the first stage ($600-1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), causing the extreme-rainfall-related MCS to have developed into a deep wet convective system and the rainfall intensity increased significantly. In the third stage, the synoptic scale forcing was greatly weakened. The convergence of southerly wind pulsations at low level and the large CAPE provided favorable conditions for the vigorous development of MCS.

Key words: July 2023 severe torrential rain, extreme precipitation, rainfall intensity, mesoscale convective system (MCS), precipitation microphysical feature, dynamic and thermodynamic condition

引 言

近年来,极端强降水频发,极端降水带来的洪涝、山体滑坡等次生灾害给人们的生产生活造成了巨大影响,这是目前以及未来相当长一段时间气候预测以及天气预报面临的严重挑战之一,相关科学问题也一直是气象界研究关注的重点和难点。

极端强降水是多尺度系统相互作用的结果。持续性区域极端强降水过程通常具有大尺度环流场的稳定维持,天气尺度或者中尺度系统的异常发展,水汽等动力、热力条件的异常性等特点(韩洁等,2012;孙军等,2012;符娇兰等,2017;张萍萍等,2018;胡宁等,2021;张霞等,2021)。而局地极端性强降水一般发生在弱天气尺度强迫下,主要与稳定少动的中小尺度系统发生发展以及有利的下垫面等条件有关

(田付友等,2018;徐珺等,2018;李琴和邓承之,2021;汪海恒等,2021;潘佳文等,2022;陈博宇等,2023)。无论是哪一种类型的极端强降水,其时空演变特征均与中小尺度系统发生发展直接相关。Wei et al (2023)认为“21·7”河南极端降水是由准静止的对流风暴造成的,低层偏北气流与 β 中尺度涡旋偏南风气流达到了平衡,最终使得对流风暴稳定维持,造成了极端小时雨强的出现。也有不少极端降水个例研究指出,极端强降水伴有多个 γ 中尺度系统以及MCS后向传播、列车效应等过程(徐珺等,2018;汪海恒等,2021;陈博宇等,2023)。

极端降水强度不仅与多尺度天气系统及有利的环境条件有关,也与雨滴尺度分布以及微物理过程直接相关,不同降水系统微物理过程不同。潘佳文等(2022)对一次副热带高压(以下简称副高)背景下的极端强降水分析指出,更大、更浓密的降水粒子形

成了极高的降雨效率,过程中暖雨过程和冰相过程并存,前者对雨水的形成起主导作用,冰相粒子的融化加速了这一进程。李欣和张璐(2022)研究表明北上台风降水与典型台风降水相比,雨滴平均直径更大、浓度更低,雨滴的碰并增长和对云水的聚集作用在对流性降水中占主导地位,同时深厚的淞附过程对极端强降水的出现也起到了重要作用。Chen et al (2022)指出河南“21·7”极端降雨微物理过程时空分布不均匀:平原地区强降水表现出高浓度、大粒径的雨滴特征,这是由对流系统内活跃的冰相过程和有效的暖雨碰撞聚集过程共同造成的;而山前地区强降水,大雨滴数量较少可忽略不计,且对流系统内冰相过程受限,主要表现为液态粒子的高效率聚集凝结过程。可见,极端降水过程雨滴分布以及微物理过程是非常复杂的,不同过程甚至同一过程的不同阶段、不同区域表现出的微物理过程不尽相同。

2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日,受台风杜苏芮残余环流以及副高与大陆高压的共同影响,华北出现了持续性区域极端强降水,多个气象观测站点降水量突破历史极值(张芳华等,2023;杨晓亮等,2023)。气象部门对过程累计降水量、日降水量以及相应的降水中心极值、强降水落区均做出了相当准确的预报,为政府部门防灾减灾提供了重要支撑。但由于目前对强降水精细化演变,特别是不同阶段中尺度对流系统(MCS)发生发展及小时雨强变化特征等认识有限且预报支撑不足,导致短期时效内小时雨强时空精细化预报仍存在较大的难度。因此有必要对此次过程不同阶段雨强精细化特征、MCS、微物理过程以及相应的动力和热力条件等进行分析,从而为提升极端强降水精细化演变特征的认识水平和预报能力提供参考。

1 资料和方法

所用资料包括 7 月 29 日至 8 月 1 日期间全国 7 万多个地面自动观测气象站、京津冀 2 个探空站、京津冀 175 个地面雨滴谱仪(OTT)、3 部 S 波段双偏振雷达、4 部风廓线雷达、闪电定位仪等多源观测以及 ERA5 再分析资料(空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为 1 h, 垂直层为 19 层)。本文所用到的探空、雨滴谱仪、双偏振雷达以及风廓线雷达站点空间分布情况具体见图 1。

雨滴谱数据为逐分钟观测,首先对其进行质量控制,剔除直径 6 mm 以上、信噪比较大的观测记

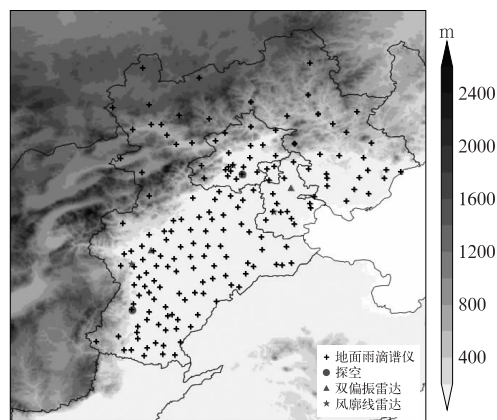


图 1 研究区域站点分布及海拔高度(阴影)

Fig. 1 Spatial distribution and the altitude (shaded) of the study area

录,获得全部站点在有效观测时段的雨滴谱分布数据。然后通过式(1)~式(5)分别计算得到总粒子浓度 $N(D_i)$ 、液态水含量 W (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、平均直径 D_0 (单位: mm)、质量加权平均直径 D_m (单位: mm) 以及归一化截距参数 N_w (单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$) (Chen et al, 2022)。

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^n \frac{n_{ij}}{A_i V_j \Delta D_i} \quad (1)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \times 10^{-3} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_i^3 \frac{n_{ij}}{A_i V_j} \quad (2)$$

$$D_0 = \frac{\sum_{i=1}^m N(D_i) D_i \Delta D_i}{\sum_{i=1}^m N(D_i) \Delta D_i} \quad (3)$$

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^m N(D_i) D_i^4 \Delta D_i}{\sum_{i=1}^m N(D_i) D_i^3 \Delta D_i} \quad (4)$$

$$N_w = \frac{3.67^4}{\pi} \left(\frac{10^3 W}{D_0^4} \right) \quad (5)$$

式中: n 为粒子速度档数,京津冀地区绝大多数雨滴谱观测仪记录粒子速度档数为 32,少数仪器粒子速度档数为 22; D_i 为第 i 直径档直径; n_{ij} 为第 i 直径档第 j 速度档的粒子个数; A_i 为取样面积; V_j 为第 j 速度档的粒子下落速度; ΔD_i 为第 i 直径档的宽度; m 为粒子直径档数,京津冀地区绝大多数雨滴谱观测仪记录粒子直径档数为 32,少数仪器粒子直径档数为 20。

2 雨强精细化特征

2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日过程累计降水量

显示(图2a),北京、河北大部、天津、山西东部等地累计降水量达到50~250 mm,北京西部、河北中南部等地部分地区达到300~600 mm,北京门头沟、昌平以及河北保定、石家庄、邢台、邯郸等地局地超过700 mm,最大达1003.4 mm(邢台临县梁家庄村)。逐日降水量显示(图略),29日,河北中南部、山西东南部等地部分地区出现暴雨到大暴雨,河北邯郸、邢台以及石家庄沿山一带出现特大暴雨,最大达511.1 mm;30日,强降水进一步发展,并向北扩展,北京中南部、天津、河北中南部、山西东部等地出现持续性暴雨到大暴雨,北京门头沟、房山及昌平西南部山区、河北保定大部、石家庄及邢台沿山一带等地出现了特大暴雨,最大达483.5 mm;31日,强降水范围明显减小,强度有所减弱,北京、河北中北部以及天津北部等地出现暴雨到大暴雨,河北保定、北京门头沟、昌平以及怀柔沿山一带局地出现特大暴雨,最大达394.8 mm;1日,强降水过程趋于结束,北京、河北中东部、天津等地部分地区出现中到大雨,局地暴雨或大暴雨。

根据天气系统演变以及雨强变化可以大致将整

个降水过程划分为三个阶段:第一阶段(7月29日08:00至30日08:00),受“杜苏芮”残涡倒槽影响,降水逐步发展;第二阶段(7月30日08:00至31日20:00),“杜苏芮”残涡继续北上,强度逐步减弱,后期与上游低涡合并,对流层低层暖式切变线和东南风急流影响华北地区,为降水最强阶段;第三阶段(7月31日20:00至8月2日08:00),残涡填塞消亡,副高西伸控制华北地区,中低层为偏南气流,降水趋于减弱结束。

此次过程,小时雨强表现出面弱点强的特点,京津冀晋大部地区大部分时段雨强小于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,雨强小于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 样本的累计降水量占过程累计降水量的80%以上(图略)。从过程最大小时雨强分布可以看出(图2b),京津冀晋强降水区最大雨强一般为 $20\sim40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其累计降水量占上述区域过程累计降水量的20%~40%,河北西南部沿山和中部及北京西南部等地部分地区最大雨强达到 $50\sim82.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其中河北内丘、北京大兴、丰台有4个站次超过 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大出现在北京丰台千灵山($111.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$),主要出现在

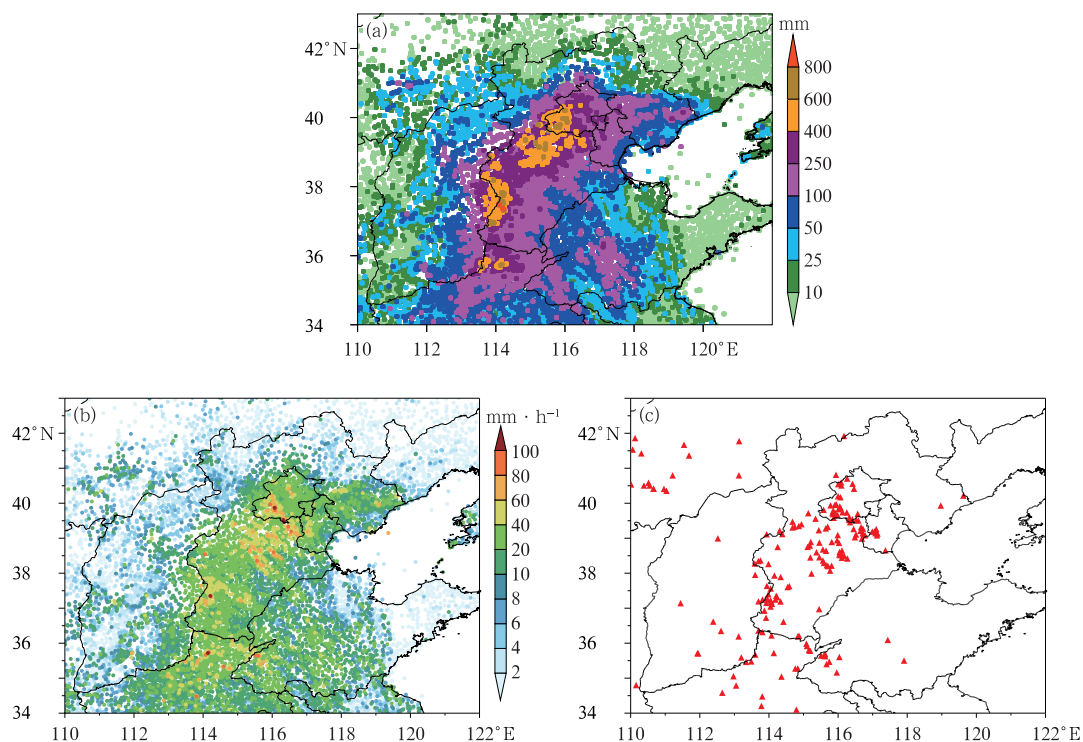


图2 2023年7月29日08:00至8月2日08:00过程(a)累计降水量,

(b)最大雨强,(c)雨强突破极值的站点分布

Fig. 2 The distribution of (a) accumulated rainfall, (b) maximum hourly rainfall intensity and (c) stations breaking the extreme hourly rainfall intensity records from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August 2023

7月31日03:00—18:00,雨强大于 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的累计降水量占过程累计降水量的比例,局地可达20%或以上。河北中南部、北京西部和南部等地局地小时雨强突破历史同期极值(为2011—2022年7—8月逐小时京津冀降水极值)(图2c)。

从时间演变来看,小时雨强也表现出明显的阶段性特征(图3)。第一阶段,小时雨强总体不大,短时强降水主要出现在河北南部和中部、北京东南部、天津南部等地,最大雨强为 $20\sim40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,河北局地超过 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。第二阶段,小时雨强明显增大,短时强降水影响范围扩大,北京中南部、河北中部和西部沿山等地雨强达到 $30\sim50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,部分地区雨强达到 $50\sim80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,局地超过 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。第三阶段,出现短时强降水的范围明显减小,北京、河北、天津西部等地出现分散性短时强降水,最大雨强为 $20\sim40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,局地超过 $70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。雨强达到 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的站次时间序列显示,第一阶段、第三阶段大于 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的站次相对较少,第二阶段站次相对较多,且表现出波

动特征。其中第一阶段最强雨强出现在29日后半夜至30日凌晨,第二阶段主要出现在30日的中午、傍晚至前半夜以及31日的上午、傍晚,第三阶段主要出现在8月1日17:00—18:00。

选取雨强大于 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的站点进一步分析了分钟级雨强演变特征(图4),分钟级雨强表现出明显波动特征,图中所示4个站点均出现了持续 $1\sim2.5\text{ mm}$ 的分钟降水量,其中3个站点最强分钟级雨强为 $3\sim3.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,且各站次累计出现时间可达 $5\sim10\text{ min}$ 。孙虎林等(2019)研究表明,分钟降水量 $\geq 1\text{ mm}$ 可以较好地反映出对流系统引发的降水在雨强上的极端性, $\geq 3.0\text{ mm}$ 则具有强极端性。“7·20”河南极端降水过程出现了持续性的 $3\sim4.7\text{ mm}$ 的分钟级降水(齐道日娜等,2022)。可见,此次过程分钟级雨强具有明显的极端性,但持续时间以及强度要明显低于河南“7·20”过程。

综上所述,此次过程累计降水量大,小时雨强表现出面弱点强的特点,局地小时雨强和分钟级雨强均表现出明显的极端性。同时,降水阶段性特征明

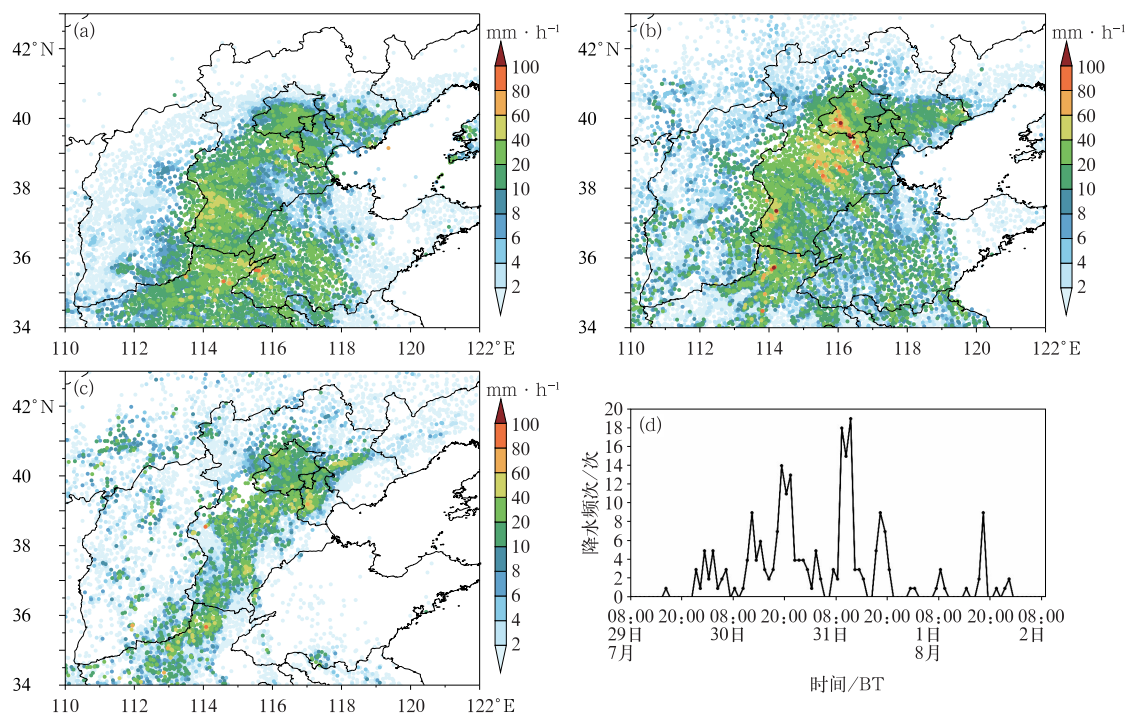


图3 2023年7月29日08:00至8月2日08:00(a~c)不同阶段最大小时雨强分布,以及(d)50 $\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上雨强站次时间序列
(a)第一阶段,(b)第二阶段,(c)第三阶段

Fig. 3 (a~c) The spatial distribution of maximum hourly rainfall intensity in different stages and (d) time series of number of stations with rainfall intensity over $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August 2023
(a) the 1st stage, (b) the 2nd stage, (b) the 3rd stage

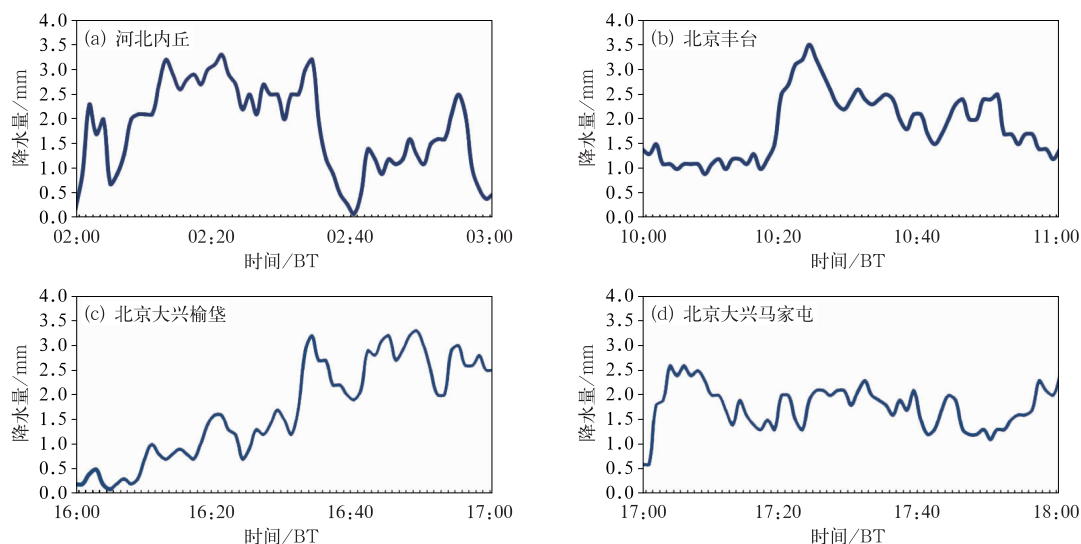


图4 2023年7月31日4个站点分钟级降水量时间序列
Fig. 4 Time series of minute rainfall at four stations on 31 July 2023

显,7月29日小时雨强相对较小,30日起雨强开始增强,至31日白天小时雨强极值达到最强,31日夜间小时雨强开始减小,强降水过程进入明显减弱与结束阶段。下文进一步从MCS发生发展、微物理特征、动力和热力条件等方面探究雨强极端性及阶段性特征的可能原因。

3 中尺度对流系统特征

此次降水过程主要以天气尺度系统造成的层积混合云降水回波为主,大部分地区组合反射率在30~40 dBz,部分时段部分区域有MCS发展。选取出现明显中尺度雨团且雨团内最大雨强大于 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的时段,进一步分析不同阶段MCS活动特征。

第一阶段降水在7月29日夜间逐渐加强。其中,30日00:00—02:00,河北石家庄西南部山前出现了明显的中尺度雨团,最大雨强达到了 $40 \sim 57 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图略)。29日午后至夜间,“杜苏芮”残涡环流东侧不断有螺旋雨带自山东向华北地区移动(图略)。图5a显示,30日00:00—02:00,河北中南部至山西东南部一带受层积混合云系影响,河北东南部有 α -MCS发展并沿着东南风向河北西南部山区移动,并在山前停滞少动,最强雷达组合反射率在40~50 dBz,导致该地区出现了明显的短时强降水天气。图6a显示,降水回波发展高度不高,回波顶高在8 km左右,35 dBz以上强度回波主要位于5 km以下,此时 0°C 层高度在5 km左右,可见该阶

段主要为低质心暖云主导型降水。

第二阶段(图5b)最强小时雨强时段有两个,分别为7月31日09:00—11:00和16:00—18:00,前一个时段中尺度雨团主要出现在北京西南部房山、门头沟以及丰台等地,后一个时段中尺度雨团主要影响北京大兴、河北永清等地。图5b的雷达组合反射率显示,31日09:00—11:00,东南风急流内有 β -MCS发展并成块状分布,中尺度对流单体回波最强为45~55 dBz,在北京西南部山前缓慢移动,导致该地区出现了明显的短时强降水天气,最强雨强达到了 $111.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。图6b显示,此阶段较第一阶段回波顶高明显增加,最大顶高在10~14 km,但35 dBz以上回波主要位于5 km以下,仍为暖云主导型降水。31日午后,河北中南部多对流单体活动,并沿高空偏南风逐渐向北移动影响北京大兴等地,16:00—18:00(图5c),对流单体合并发展,在大兴—河北永清境内发展为带状 β -MCS,MCS呈西北—东南走向,最大回波强度在45~60 dBz,大兴先后出现2个站次 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水。带状MCS回波南侧不断有新生对流单体生成合并,出现后向传播过程。由于回波走向与单体移动方向基本平行,导致大兴等地出现了列车效应,从而使得该地出现了持续性的强降水,大兴站分钟级雨强演变展现了该过程(图4c,4d)。图6c显示,对流垂直发展高度进一步升高,回波顶高在10~16 km,回波大值中心仍位于5 km以下,但对流单体35 dBz发展高度达到了10 km左右,表明该阶段除了暖云降水之外,冷云过程也起到了重要作用。

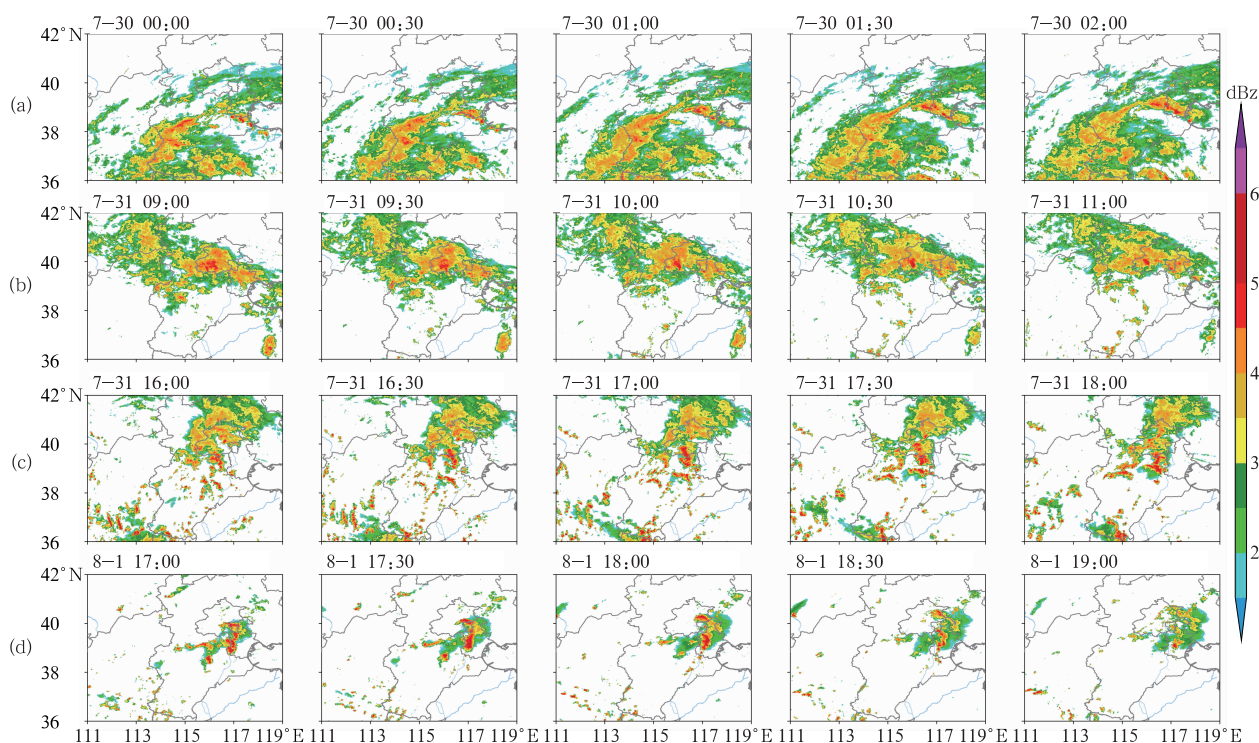


图 5 2023 年 7 月 30 日至 8 月 1 日雷达组合反射率

(a)7 月 30 日 00:00—02:00,(b)7 月 31 日 09:00—11:00,(c)7 月 31 日 16:00—18:00,(d)8 月 1 日 17:00—19:00

Fig. 5 Radar composit reflectivity from (a) 00:00 BT to 02:00 BT 30 July, (b) 09:00 BT to 11:00 BT 31 July, (c) 16:00 BT to 18:00 BT 31 July and (d) 17:00 BT to 19:00 BT 1 August 2023

第三阶段系统明显减弱,强降水范围和强度明显减小,8月1日下午至傍晚前后,在京津冀交界处附近出现了中尺度雨团,其中,17:00 天津西部出现明显短时强降水,最大雨强为 $40 \sim 75.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。1 日午后,在河北中部有分散 MCS 发展,并沿着高空西南风向东北方向移动,17:00 MCS 合并发展,并在天津境内发展为 β -MCS,呈南北向,其在东移过程中逐渐减弱,最大回波强度为 $40 \sim 60 \text{ dBz}$ 。图 6d 显示,对流垂直发展高度高,回波顶高在 $10 \sim 16 \text{ km}$,对流单体 35 dBz 发展高度接近 15 km ,表明冷云过程较第二阶段更为显著。

过程累计闪电密度分布显示(图 7a),闪电密度大值区主要位于北京南部、河北中东部、天津西部等地,过程累计降水量超过 400 mm 以上的大部分区域闪电密度相对北京南部、河北中东部、天津西部等地要小。从不同阶段闪电密度对比可以看出,第一阶段(图 7b)闪电密度非常小,仅在局地出现了少量闪电,这与该阶段降水云系主要以暖云主导有关;第二阶段(图 7c)闪电密度大值区主要位于北京大兴—河北廊坊、保定以及沧州一带,主要与 7 月 30 日下午以及 31 日傍晚前后对流系统发展有关,对流发展高度超过了 15 km ,北京西南部闪电密度相对

而言较上述区域要小,这也与对流垂直结构及发展高度吻合较好;第三阶段(图 7c),在北京南部、河北中东部、天津西部出现了分散的闪电大值区,与 8 月 1 日午后至傍晚 MCS 系统发展结构与高度基本一致。Williams and Stanfill(2002)指出对流云内出现闪电与云内混合相态过程、过冷却水在冰晶上的吸附以及冰晶与霰粒子之间的碰撞有关。

由上可见,三个阶段雷达回波垂直结构均表现出低质心的特点,这与以短时强降水为主的强对流雷达回波特征基本吻合(孙继松,2014)。除此之外,强降水时段对应的 MCS 特征则存在明显差异。第一阶段大的雨强主要由 α -MCS 造成,对流发展高度不高、强度不强,但在河北山前移动缓慢,为低质心暖云主导型降水,对应的闪电密度较小。第二阶段大的雨强主要由 β -MCS 引起,7 月 31 日上午 MCS 在北京西南部山前移动缓慢,对流发展高度明显升高,但仍以低质心暖云为主导;31 日下午,对流发展高度不断升高,维持时间较长且表现出明显的后向传播和列车效应,闪电密度较大,说明冰相过程对雨强的增强起到了非常重要的作用。第三阶段,大的雨强由发展强盛的带状 β -MCS 产生,对流发展高度高、闪电密度大,但 MCS 生命史相对较短。

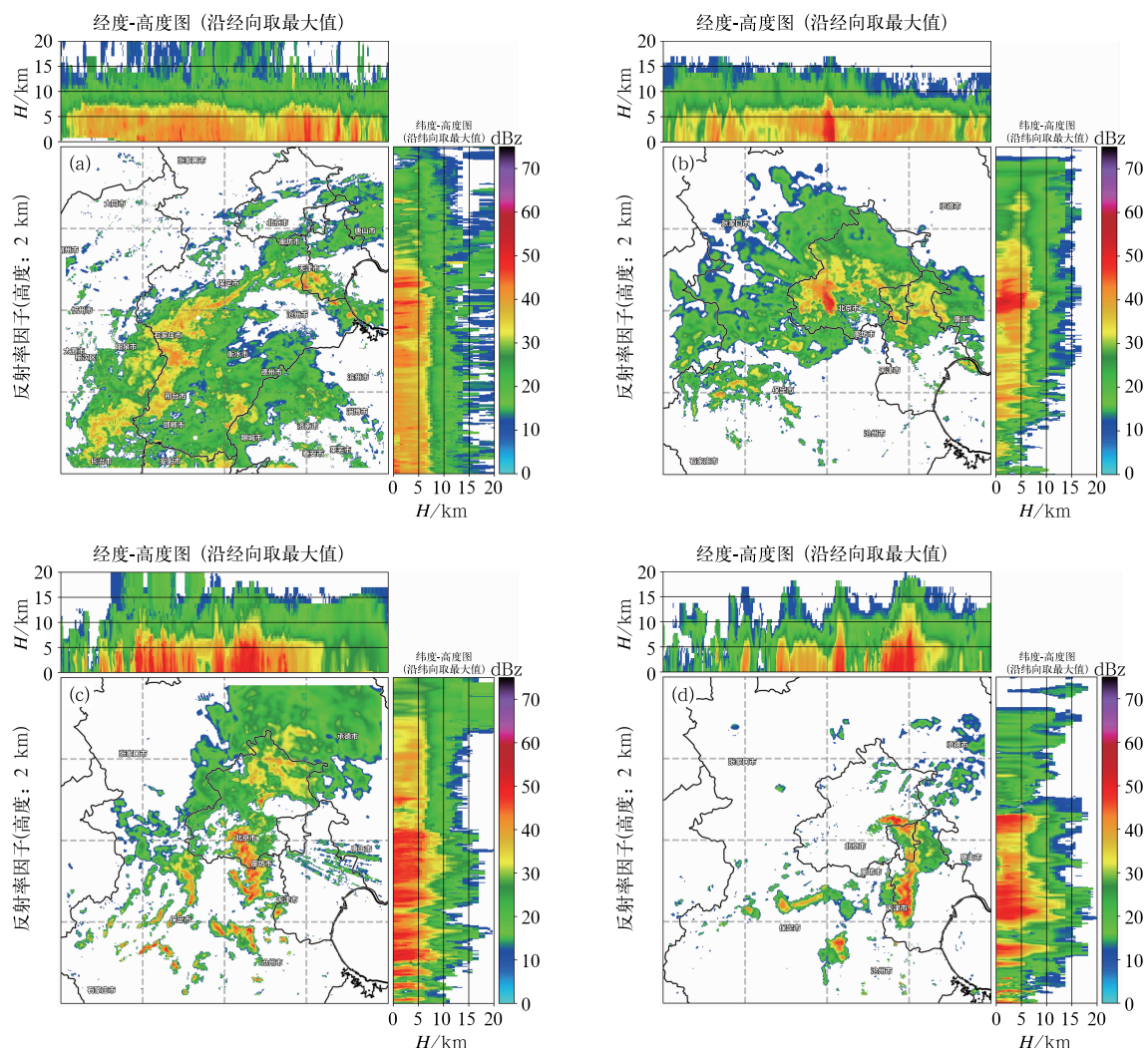


图 6 2023 年(a)7 月 30 日 01:00,(b)7 月 31 日 10:30,
(c)7 月 31 日 17:00,(d)8 月 1 日 17:30 的三维雷达组网拼图

Fig. 6 The 3D radar mosaic in different stages at (a) 01:00 BT 30 July,

(b) 10:30 BT 31 July, (c) 17:00 BT 31 July and (d) 17:30 BT 1 August 2023

4 微物理特征分析

进一步对强降水对应的双偏振雷达、雨滴谱等资料进行分析,从而更好地对比不同阶段降水微物理特征的异同点。第一阶段,最强降水出现在 7 月 30 日凌晨石家庄西南部。石家庄双偏振天气雷达剖面显示(图 8),30 日 00:30 河北西南部山前强降水对应的最大反射率因子(Z_H)为 49 dBZ,表征对流垂直发展强度的 35 dBZ 回波顶高主要维持在 6 km 以下,低于 -10°C 温度层对应的高度,表明其对流总体发展高度不高且回波质心在 4 km 以下,29 日 20:00 探空显示 0°C 层高度在 5.5 km 左右,可见该阶段主要以低质心暖云降水为主。差分反射率(Z_{DR})

与差分相移率(K_{DP})在 0°C 层以下高度的总体数值分布较窄,其最大值分别小于 1.8 dB 和 $1.8^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,表明降水粒子直径较小,粒子浓度以及液态含水量较高。 Z_{DR} 、 K_{DP} 在 0°C 层以下随高度降低迅速增加,近地面是 0°C 层高度的 2 倍以上,可推测出其液态水含量向下的快速增长,反映暖雨碰并增长过程效率较高。 Z_{DR} 柱伸展到了 -10°C 左右的高度,表明对流系统内 Z_{DR} 柱位置存在较强的上升运动,对应正浮力区,该上升运动区温度明显高于同高度环境温度。 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 层的 Z_H 基本在 30 dBZ 以下,且数值随高度降低明显增加,对应 K_{DP} 略大于 $0^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, Z_{DR} 数值基本在 1 dB 以下,反映其对应高度层上存在一定程度的冰晶聚合过程(Barnes and Houze, 2014)。而在 0°C 层高度附近, Z_H 、 Z_{DR} 的缓

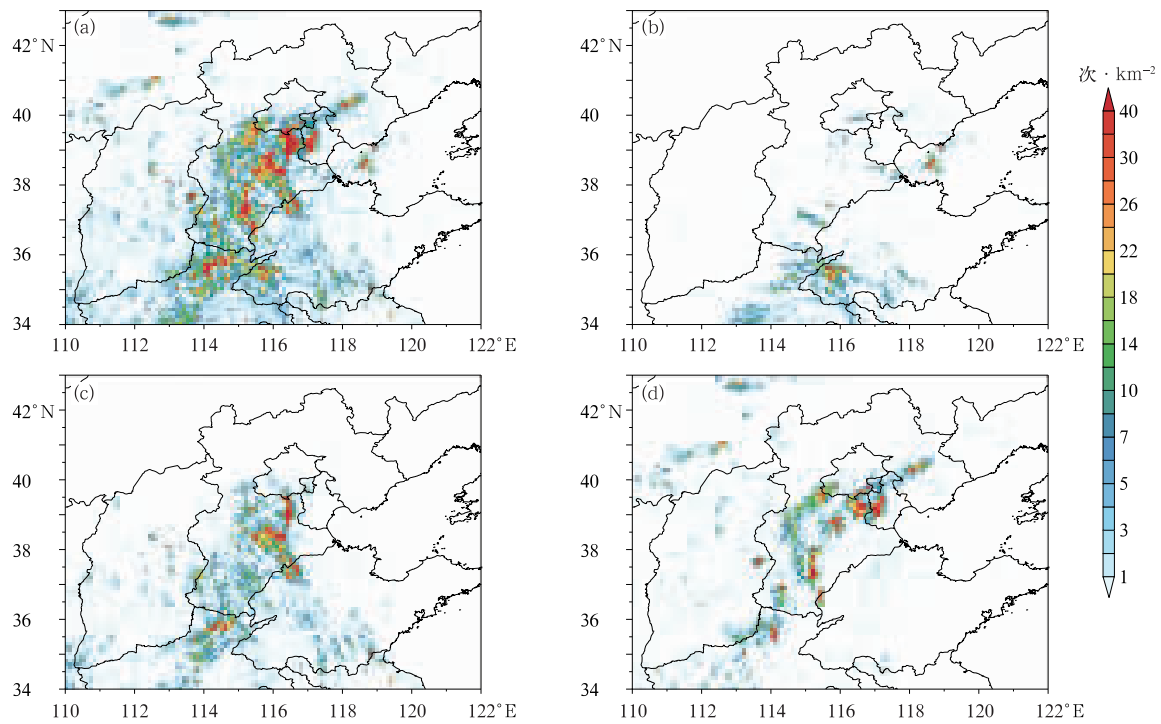


图 7 2023 年 7 月 30 日至 8 月 1 日(a)过程累计和(b~d)不同阶段闪电密度分布

(b)第一阶段,(c)第二阶段,(d)第三阶段

Fig. 7 Lightning density distribution of (a) process accumulation and

(b—d) different stages from 30 July to 1 August 2023

(b) the 1st stage, (c) the 2nd stage, (d) the 3rd stage

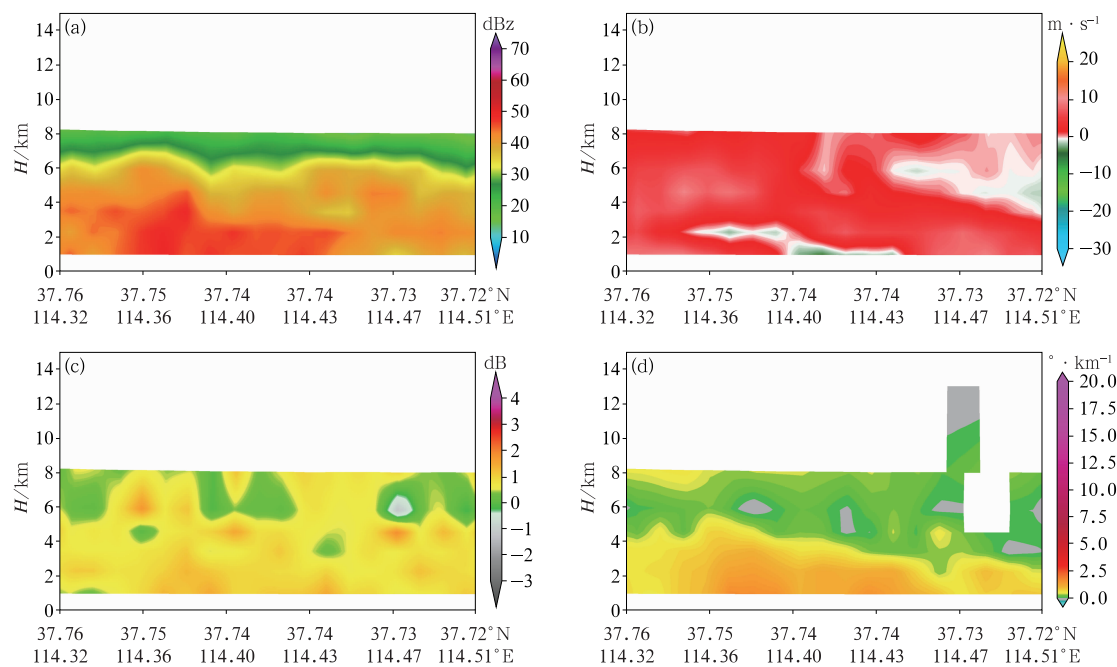


图 8 2023 年 7 月 30 日 00:30 石家庄双偏振天气雷达沿(37.76°N,114.32°E)—(37.72°N,114.51°E)的剖面

(a) Z_H , (b) 径向速度, (c) Z_{DR} , (d) K_{DP}

Fig. 8 Cross-section of Shijiazhuang Dual Polarization Radar along

(37.76°N,114.32°E)—(37.72°N,114.51°E) at 00:30 BT 30 July 2023

(a) Z_H , (b) radial velocity, (c) Z_{DR} , (d) K_{DP}

慢增加表明存在一定程度的冰晶聚合体融化,对应相关系数在 0.90~0.95(图略)。总体而言,该阶段对流发展较浅,主要还是以暖雨碰并增长为主,辅以一定程度的冰晶聚合及融化过程。

第二阶段最强雨强出现在 7 月 31 日白天。图 9 为 31 日 10:42 北京双偏振天气雷达剖面,显示丰台附近强降水最大 Z_H 为 60 dBz,35 dBz 回波顶高达 10 km 左右,高于 -20°C 层对应的高度,表明对流发展高度高,但回波质心位于 5.5 km 以下。 Z_{DR} 与 K_{DP} 在 0°C 层以下高度的总体数值分布宽,其最大值分别小于 4.5 dB 和 $5.0^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,表明此时对应的雨滴粒子直径大、浓度高,液态含水量高,可能还伴有融化的冰雹或霰粒子混合物,对应的小时雨强明显大于 30 日凌晨石家庄西南部降水。 0°C 层以下高度, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 数值随高度减小逐步增大,反映雨滴在暖云内的增长过程快,较第一阶段暖云增长过程更为显著。与此同时, $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$ 层附近对应高度层, Z_H 随高度下降明显增加, Z_H 数值整体低于 35 dBz, Z_{DR} 、 K_{DP} 数值均略大于零,表明出现了冰晶聚合过程(Barnes and Houze, 2014)。而在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 层, Z_H 大于 35 dBz,且 K_{DP} 、 Z_{DR} 数值分别约增大

至 $1^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 1 dB,可推断其对应高度层区间存在较高比例因淞附过程形成的霰粒子(Barnes and Houze, 2014),而在 0°C 层与 4 km 高度区间内, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 向下快速增加,这对应了较大尺寸的冰相粒子(霰粒子、雹等)融化。可见,31 日对流发展旺盛,降水粒子大、粒子浓度和液态含水量高,除暖雨碰并之外,冰相粒子聚合和融化过程对雨强增加起到了重要作用。

第三阶段强降水主要出现在 8 月 1 日 17:00 前后。天津宝坻双偏振天气雷达回波剖面显示(图略),最大 Z_H 为 60 dBz 左右,35 dBz 回波顶高达 14 km 左右,对流发展高度比第二阶段还高,表明冰相聚合以及融化过程较第二阶段更为显著。 Z_{DR} 与 K_{DP} 在 0°C 层以下高度的总体数值分布宽,其最大值分别小于 5.7 dB 和 $4.9^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, Z_{DR} 、 K_{DP} 数值总体较第二阶段大,此时对应的雨滴粒子直径大、浓度高,液态含水量高,且可能存在融化的冰雹或霰粒子混合物,同时,在 4 km 以下层次 Z_{DR} 向下明显增长, K_{DP} 也随高度减小增加,表明该阶段也存在明显的暖雨碰并过程。

进一步从三个阶段雨滴谱分布分析近地面降水

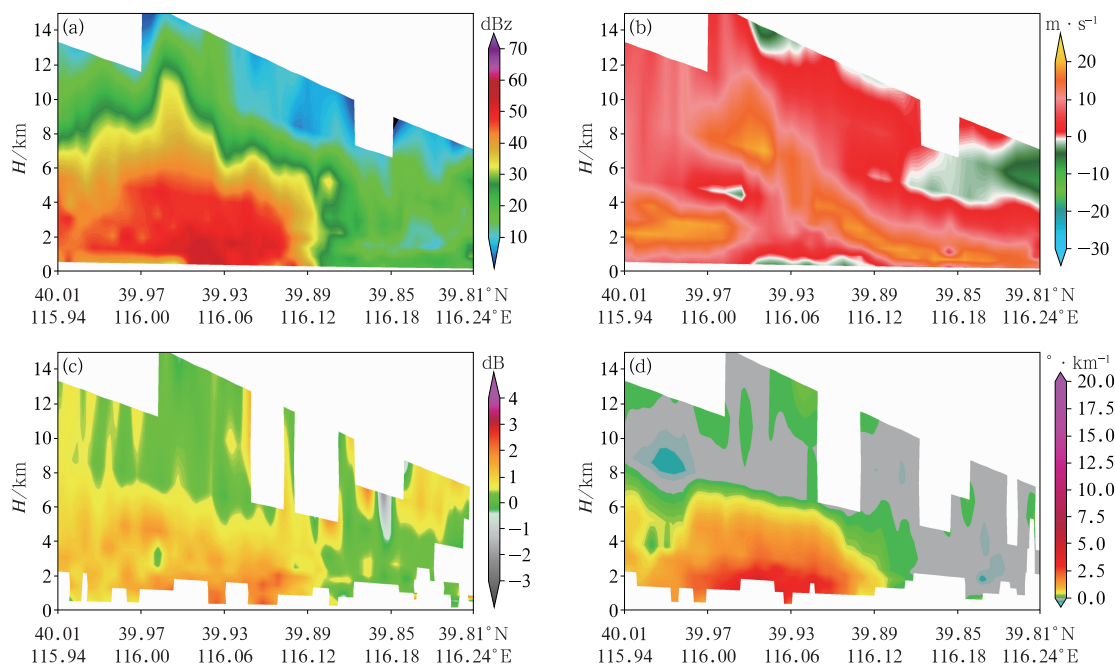


图 9 2023 年 7 月 31 日 10:42 北京双偏振天气雷达沿 $(40.01^{\circ}\text{N}, 115.94^{\circ}\text{E})-(39.81^{\circ}\text{N}, 116.24^{\circ}\text{E})$ 的剖面
(a) Z_H , (b) 径向速度, (c) Z_{DR} , (d) K_{DP}

Fig. 9 Cross-section of Beijing Dual Polarization Radar along $(40.01^{\circ}\text{N}, 115.94^{\circ}\text{E})-(39.81^{\circ}\text{N}, 116.24^{\circ}\text{E})$
at 10:42 BT 31 July 2023

(a) Z_H , (b) radial velocity, (c) Z_{DR} , (d) K_{DP}

的微物理特征。图 10a 显示,第一阶段降水粒子主要以中等粒径($1\text{ mm} < D_m \leq 3\text{ mm}$)为主,粒子浓度 $\lg(N_w)$ 在 $4.5 \sim 5.5\text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,大粒子($D_m > 3\text{ mm}$)样本较少,但浓度 $\lg(N_w) > 5.0\text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,对应的液态水含量(W)在 $4\text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,表明该阶段雨强相对较大,以高浓度的中等粒子为主。依据 Bringi et al(2003)对降水微物理过程类型的分类研究,该阶段主要以海洋性降水特征为主,大陆性对流降水样本相对较少。第二阶段仍以高浓度的中等粒径为主,但高液态水含量以及大陆性对流降水样本(大粒径、低浓度)明显增加(图 10b),结合雷达变量分析,可知大粒径雨滴主要出现于存在冰相过程的深对流中(Chen et al, 2022)。该阶段 N_w - D_m 数值处于海洋性降水与大陆性对流性降水特征区域的中间(Bringi et al, 2003)。第三阶段强降水样本相对较少,但其 N_w - D_m 分布与第二阶段类似(图 10c),既有高浓度的中等粒径雨滴,也有低浓度的大粒径样本,也表现出海洋性降水与大陆性对流性降水混合状态。

5 MCS 发生发展动力和热力条件分析

接下来进一步分析不同阶段 MCS 发生发展的动力和热力条件。7 月 29 日至 8 月 1 日,台风杜苏芮减弱后的残余环流继续北上影响华北地区,其东侧副高和北侧大陆高压打通形成高压坝,导致其移

动缓慢,且其东侧以及北侧存在偏南和偏东急流,同时华北地区位于 200 hPa 高层副热带西风急流入口区右侧,此外台风卡努位于台湾以东洋面,大尺度环流背景和天气尺度系统为中小尺度系统发生发展以及持续性强降水提供了有利的动力抬升、水汽等条件。

在第一阶段,台风杜苏芮减弱后的残余环流中心位于河南境内,京津冀地区受低压倒槽控制,其中河北西南部沿山附近偏东风与东北风风速较大, 850 hPa 偏东急流风速超过了 $16\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 11a)。风廓线显示(图 12a),7 月 30 日 00:00 前后石家庄附近 $900 \sim 850\text{ hPa}$ 出现偏东风急流脉动,最大风速达到了 $20\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。受倒槽辐合以及偏东风急流地形抬升共同影响,该地区 850 hPa 辐合超过了一 $4 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,与此同时, 200 hPa 高空急流入口区辐散达到了 $4 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 以上,高空抽吸以及低层辐合有利于强上升运动的发展(图 11a)。雷达径向速度剖面显示(图 8b),山前对流发展导致边界层有偏北风出流,偏北风与偏东风在山前对峙,为 MCS 在山前的维持提供了有利条件。受副高外围偏南急流以及低压残余环流水汽输送影响,整层可降水量达到了 60 mm 以上,其中河北南部达到了 70 mm 以上,河北中南部对流有效位能(CAPE)在 $500\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右(图 13a)。在石家庄西南部出现强降水前(29 日 20:00),其南部邢台 CAPE 超过了 $1300\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,湿层非常深厚,且 CAPE 为狭长型,抬升凝结高度为 184 m (图 14a),有利于中小尺度系统发展以及强

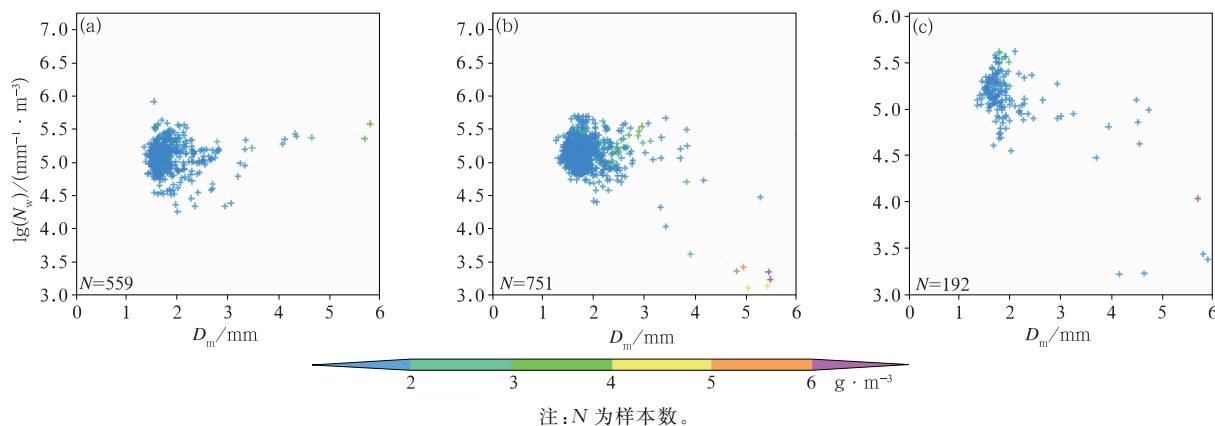


图 10 2023 年 7 月 30 日至 8 月 1 日不同阶段雨滴谱分布特征

(a) 第一阶段, (b) 第二阶段, (c) 第三阶段

Fig. 10 Distribution of raindrop spectra in different stages from 30 July to 1 August 2023

(a) the 1st stage, (b) the 2nd stage, (c) the 3rd stage

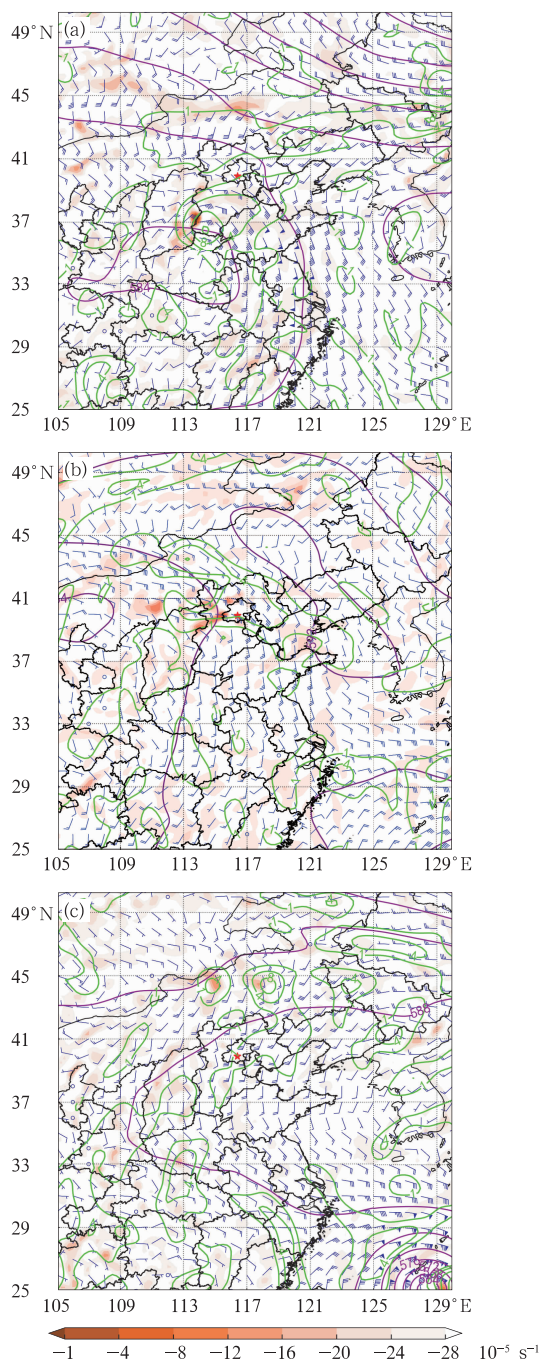


图 11 2023 年(a)7 月 30 日 00:00,(b)7 月 31 日 10:00,(c)8 月 1 日 16:00 的 500 hPa 高度场 (紫色等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风羽)、850 hPa 辐合区(填色)、200 hPa 辐散场(绿色等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 11 The 500 hPa geopotential height (purple contour, unit: dagpm), 850 hPa wind (barb), 850 hPa convergence (colored) and 200 hPa divergence (green contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) at (a) 00:00 BT 30 July, (b) 10:00 BT 31 July, (c) 16:00 BT 1 August 2023

降水的产生(Davis, 2001)。

在第二阶段,低压残余环流进一步北上,强度有所减弱,7 月 30 日 20:00 前后低压环流与其上游的西北地区东南部弱低压环流合并。与此同时,副高进一步西伸,北侧高压坝进一步发展,东南急流较为强盛,华北平原中北部地区位于偏南风与东南风暖切变辐合区内,同时东南风受河北中部以及北京西部山前地形抬升影响。此外,200 hPa 高空急流进一步北收,辐散区主要位于河北中部—北京一带(图 11b)。风廓线显示(图 12b, 12c),31 日 09:00—11:00,近地面偏东风加强,对流层低层至 700 hPa 有东南风强烈发展,最大风速超过 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应北京西部山前有明显的对流发展,对流伸展高度明显高于第一阶段,随着低空急流强度减小以及层次变薄,对流和强降水有所减弱。而 31 日下午,随着天气尺度系统的减弱,偏南风与偏东风较前期整体减弱明显,但 16:00—18:00,偏东风与偏南风出现脉动,强度再次加强,925 hPa 以上偏东风加大至 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,850~700 hPa 偏南风加强至 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,500 hPa 以上偏南风加大,边界层偏东风以及中低层偏南风脉动为该时段 MCS 发展提供了有利抬升条件。此外,从雷达径向速度剖面也可以看出(图 9b),31 日 10:42,边界层内有明显的出流,对流出流与偏东风在山前对峙,为 MCS 维持以及新生提供了有利条件。与此同时,31 日 18:00 前后,北京大兴、河北保定附近除了监测到明显的偏北风出流与环境偏南风的辐合区,使得该阶段出现了后向传播以及列车效应外,同时也监测到了多个中尺度涡旋(图略),为 MCS 发生发展提供了非常有利的抬升条件。此时除副高外围偏南气流水汽输送之外,台风卡努水汽远距离输送也为第二阶段水汽供应起到了关键作用。此时,整层可降水量大于 70 mm 的区域主要位于河北中部、北京以及天津一带。受持续降水影响,北京地区 CAPE 不断得到释放,减少为 $100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右(图 13b)。从北京站 31 日 08:00 探空曲线可以看出(图 14b),此时仍表现为湿层深厚、狭长 CAPE 的特点,CAPE 为 $195 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,其上游河北邢台、山东章丘 CAPE 在 $500 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 31 日中午前后(图 14c),受偏南暖湿输送以及对流层中上层干层的影响,对流能量得到重建,北京地区 CAPE 增加至超过 $400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,

河北邢台站 CAPE 超过 $3300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略), ERA5 分析场显示, 17:00 河北南部 CAPE 为 $600 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略), 为 31 日下午北京大兴及河北廊坊等地 MCS 的发展提供了有利的能量和水汽条件。

在第三阶段, 副高进一步西伸加强, 合并后的弱低压环流东移北上控制我国内蒙古等地, 高空急流也进一步东移, 华北低层受偏南气流控制, 高空受反气旋影响, 天气尺度抬升明显减弱, 但此时偏南风仍维持在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右 (图 11c)。从风廓线 (图 12d) 可以看出, 8 月 1 日 17:00 前后, 南风存在明显的脉动, 7 km 以下南风风速明显加大, 强南风脉动辐合

为 MCS 的发展提供了有利的动力抬升条件。雷达径向速度剖面上 (图略), 主要以一致的偏南风为主, 未在对流剖面附近监测到明显的出流与环境风场的辐合区, 这也是该阶段对流系统维持时间较短, 且在东移过程中并未出现明显的对流单体新生的原因。与此同时, 台风卡努远距离水汽输送为对流发展提供了有利的水汽条件 (图 13c), 京津冀交界处整层可降水量达到了 70 mm 以上, 而且对流不稳定能量增长至 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上 (图 14d)。尽管该阶段低压环流明显减弱北上, 但华北中东部地区偏南风急流脉动发展与强的对流不稳定能量的存在仍然可为 MCS 发展提供有利的动力和热力条件。

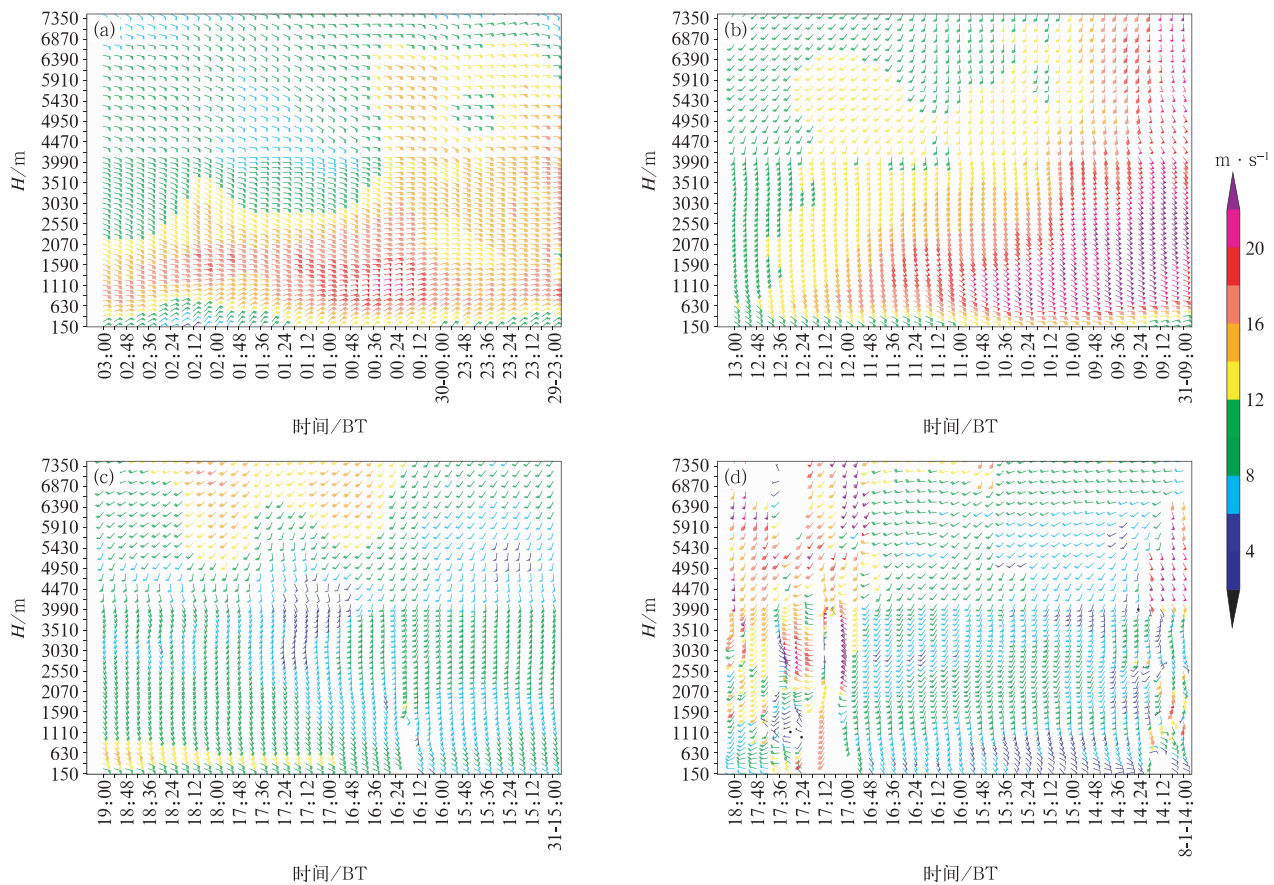


图 12 2023 年 (a) 7 月 29 日 23:00 至 30 日 03:00 河北石家庄站, (b) 7 月 31 日 09:00—13:00 北京海淀站, (c) 7 月 31 日 15:00—19:00 北京南郊站, (d) 8 月 1 日 14:00—18:00 天津西青站的风廓线雷达水平风场

Fig. 12 Horizontal wind of wind-profiling radars at (a) Shijiazhuang Station from 23:00 BT 29 to 03:00 BT 30 July, (b) Haidian Station from 09:00 BT to 13:00 BT 31 July, (c) Nanjiao Station from 15:00 BT to 19:00 BT 31 July and (d) Xiqing Station from 14:00 BT to 18:00 BT 1 August 2023

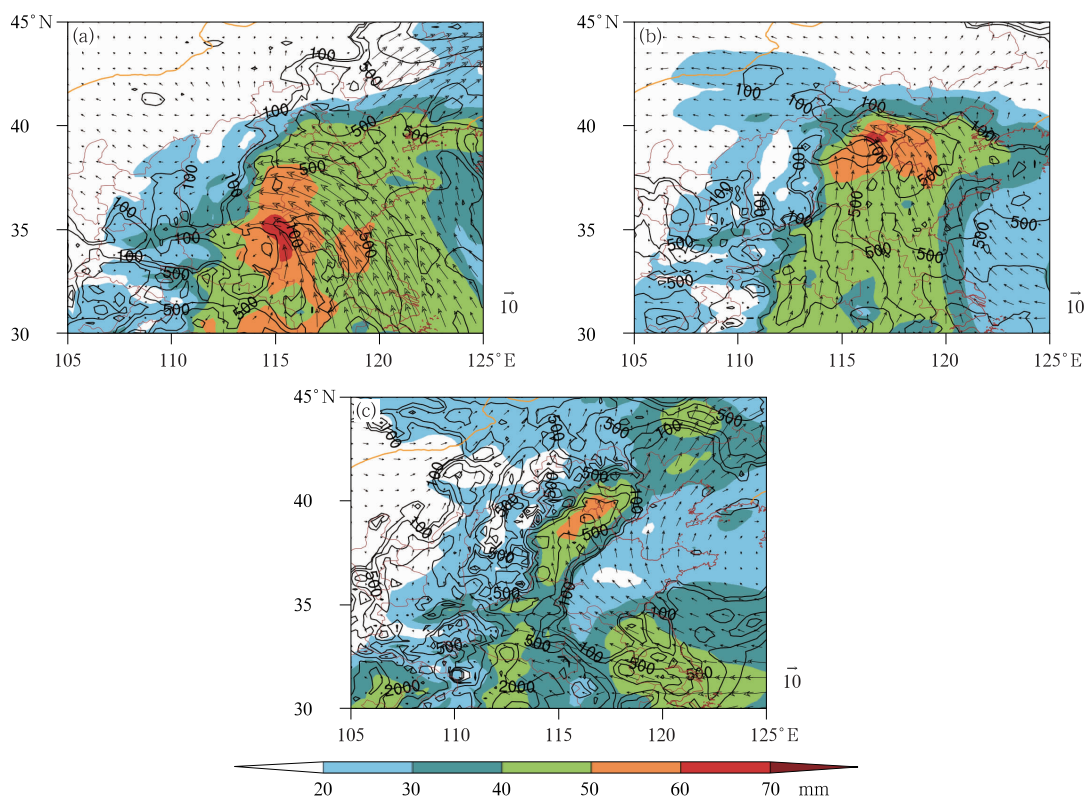


图 13 2023 年(a) 7 月 29 日 23:00, (b) 7 月 31 日 09:00, (c) 8 月 1 日 16:00 的 CAPE(等值线, 单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、整层可降水量(填色)以及 850 hPa 水汽通量分布(箭头, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 13 The different-stage CAPE (contour, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), integrated precipitable water (colored), and 850 hPa water vapor flux (vector, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 23:00 BT 29 July, (b) 09:00 BT 31 July and (c) 16:00 BT 1 August 2023

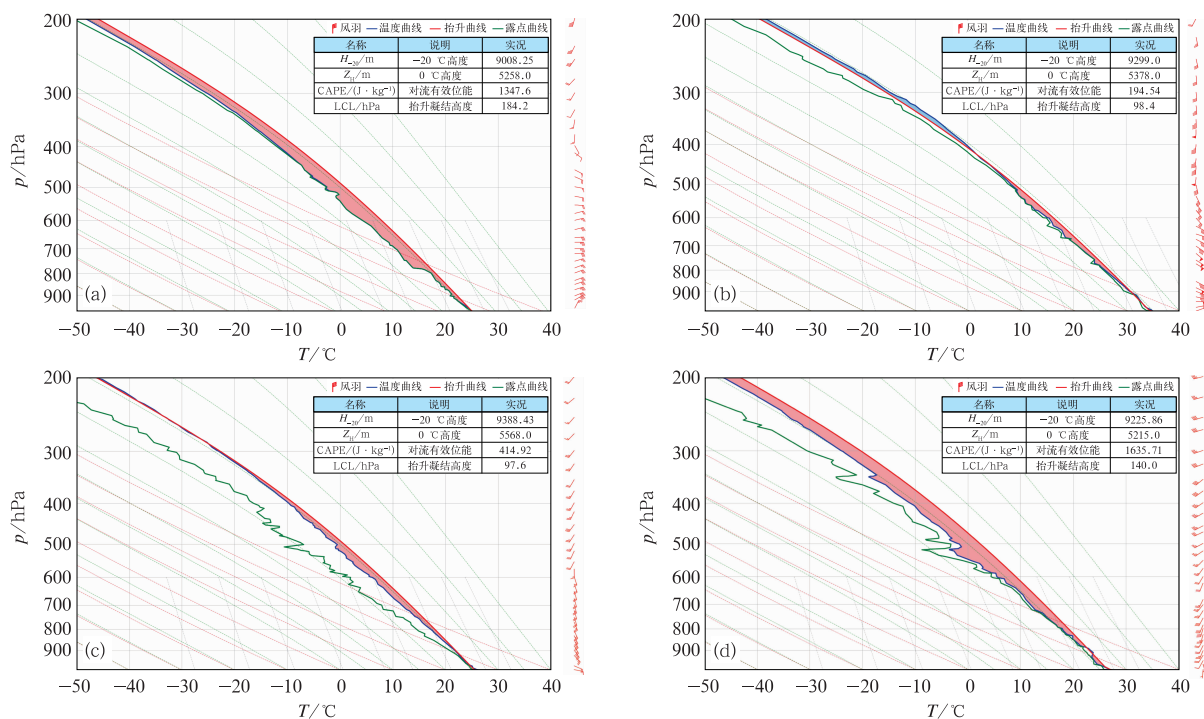


图 14 2023 年(a) 7 月 29 日 20:00 河北邢台站, (b) 7 月 31 日 08:00 北京站, (c) 7 月 31 日 14:00 北京站, (d) 8 月 1 日 14:00 北京站的 T - $\ln p$ 图

Fig. 14 T - $\ln p$ diagrams for (a) Xingtai Station at 20:00 BT 29 July, (b) Beijing Station at 08:00 BT 31 July, (c) Beijing Station at 14:00 BT 31 July and (d) Beijing Station at 14:00 BT 1 August 2023

6 结论与讨论

基于地面自动气象站、双偏振雷达、风廓线雷达、闪电定位仪、地面雨滴谱仪以及 ERA5 再分析资料,对 2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日华北极端强降水的雨强精细化特征、MCS、微物理特征及其发生发展的动力和热力条件进行了初步分析,结论如下。

(1)此次极端强降水过程小时雨强表现出面弱点强的特点,局地雨强大,小时、分钟级雨强均具有一定的极端性。雨强表现出明显的阶段性特征:第一阶段(7 月 29 日 08:00 至 30 日 08:00)为降水开始发展阶段,雨强相对较小;第二阶段(7 月 30 日 08:00 至 31 日 20:00),为降水最强时段,雨强最强,大于 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强主要出现在该阶段后期;第三阶段(7 月 31 日 20:00 至 8 月 2 日 08:00),过程降水和小时雨强均明显减弱,最大小时雨强略强于第一阶段。

(2)三个阶段强降水时段对应的 MCS 和微物理特征也存在明显差异。第一阶段大的雨强主要由 α -MCS 造成,对流发展高度不高、强度不强、移动缓慢,以低质心暖云降水为主,对应的闪电密度较小,雨滴直径中等、浓度较大,以暖云碰并增长为主,海洋性降水特征更明显;第二阶段大的雨强主要由 β -MCS 造成,对流发展高度明显升高,除暖云降水之外,冷云降水也起了非常重要的作用,闪电密度较大,且表现出明显的后向传播和列车效应,雨滴直径明显增大、浓度增加,海洋性降水与陆地性降水特征共存,暖雨碰并增长与冰晶聚合、淞附以及融化过程共存;第三阶段,大的雨强由发展强盛的带状 β -MCS 产生,对流发展高度更高、闪电密度大,但 MCS 生命史相对较短,较第二阶段冷云降水过程更为显著,同时存在暖云碰并增长过程。与第二阶段类似,该阶段既有高浓度的中等粒径雨滴,也有低浓度的大粒径样本,海洋性降水与陆地性降水特征共存。

(3)第一阶段天气尺度强迫强,台风杜苏芮残涡倒槽辐合以及偏东风急流地形强迫抬升为强降水出现提供了有利动力条件,且水汽充沛,CAPE 在 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,主要以层积混合云为主,MCS 发展高度相对较低。第二阶段台风杜苏芮残涡环流逐步减弱与上游低压合并,东南风与偏南风暖式切变以及东南风急流地形抬升或偏南风脉动辐合抬升明显。

此外,对流出流与偏南风脉动辐合为 7 月 31 日下午 MCS 的后向传播以及列车效应提供了有利条件。台风卡努水汽远距离输送为这一阶段 MCS 和强降水提供了充沛的水汽。受低层暖湿输送与中高层干空气共同影响,该阶段后期对流不稳定能量再次重建,上游地区 CAPE 达到了 $600 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,有利于深厚对流系统的发展。第三阶段,低压环流明显减弱,但整层可降水量仍然非常充沛,偏南风急流脉动辐合为该阶段 MCS 和降水提供了动力条件,由于该阶段对流不稳定能量大,导致该阶段 MCS 发展强度高、伸展高度高。

综上所述,此次过程不同阶段雨强特征与中尺度系统发生发展、微物理特征直接相关,天气尺度系统以及水汽热力条件为强降水和中尺度系统提供了有利背景。三个阶段,第一阶段为台风杜苏芮残涡最强阶段,水汽充沛,具有一定的对流不稳定能量,但对流系统及雨强明显弱于另外两个阶段;第二个阶段残涡逐渐减弱,后期天气尺度抬升条件不及第一阶段,24 h 累计强降水范围和强度明显减小,但对流不稳定能量有所增加,出现了多个深厚对流系统,且小时雨强为整个过程最强。目前,不同阶段多尺度系统发生发展对小时雨强变化的影响机制尚不清楚,仍需要进一步深入研究。此外,短期时效内仅依据动力、水汽以及不稳定条件对雨强精细化特征进行预报是远远不够的,特别是在天气尺度强迫减弱阶段,准确研判对流系统发展强度以及可能出现的后向传播以及列车效应等中尺度过程是极端雨强预报的关键。

参考文献

- 陈博宇,湛芸,孙继松,等,2023. 诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制[J]. 大气科学,47(1):1-19. Chen B Y, Chen Y, Sun J S, et al, 2023. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the “6.26” mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan Province[J]. Chin J Atmos Sci, 47(1):1-19(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).
- 韩洁,管兆勇,李明刚,2012. 夏季长江中下游流域性极端日降水事件的环流异常特征及其与非极端事件的比较[J]. 热带气象学报,28(3):367-378. Han J, Guan Z Y, Li M G, 2012. Comparisons of circulation anomalies between the daily precipitation extreme and non-extreme events in the middle and lower reaches of Yangtze River in boreal summer[J]. J Trop Meteor, 28(3):367-378

- (in Chinese).
- 胡宁,符娇兰,孙军,等,2021.北京一次冬季极端降水过程中相态转换预报的误差分析[J].气象学报,79(2):328-339. Hu N, Fu J L, Sun J, et al, 2021. Errors in the forecast of precipitation type transition in an extreme winter precipitation event in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 79(2): 328-339 (in Chinese).
- 李琴,邓承之,2021.重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分析[J].气象,47(9):1073-1085. Li Q, Deng C Z, 2021. Analysis of a short-time extreme precipitation event in Chongqing under weak synoptic forcing[J]. Meteor Mon, 47(9): 1073-1085 (in Chinese).
- 李欣,张璐,2022.北上台风强降水形成机制及微物理特征[J].应用气象学报,33(1):29-42. Li X, Zhang L, 2022. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoon[J]. J Appl Meteor Sci, 33(1): 29-42 (in Chinese).
- 潘佳文,彭婕,魏鸣,等,2022.副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析[J].气象学报,80(5):748-764. Pan J W, Peng J, Wei M, et al, 2022. Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 80(5): 748-764 (in Chinese).
- 齐道日娜,何立富,王秀明,等,2022.“7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J].应用气象学报,33(1):1-15. Dorina C, He L F, Wang X M, et al, 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021[J]. J Appl Meteor Sci, 33(1): 1-15 (in Chinese).
- 孙虎林,黄焕卿,于庆龙,等,2019.2012—2017年珠江口海区短时强对流天气灾害的统计分析[J].海洋预报,36(4):35-43. Sun H L, Huang H Q, Yu Q L, et al, 2019. Statistical analysis on the short-term convective weather disasters in the Pearl River Estuary from 2012 to 2017[J]. Mar Forecasts, 36(4): 35-43 (in Chinese).
- 孙继松,2014.从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作用[J].气象,40(1):1-6. Sun J S, 2014. Role of cloud physics in precipitation forecasting by synoptic dynamics[J]. Meteor Mon, 40(1): 1-6 (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).
- 田付友,郑永光,张小玲,等,2018.2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484 (in Chinese).
- 汪海恒,张曙,伍志方,等,2021.2019年韶关“5·18”局地特大暴雨极端性成因分析[J].热带气象学报,37(1):49-60. Wang H H, Zhang S, Wu Z F, et al, 2021. Analysis of the cause of torrential rain on May 18, 2019 in Shaoguan[J]. J Trop Meteor, 37(1): 49-60 (in Chinese).
- 徐珺,毕宝贵,湛芸,等,2018.“5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J].气象学报,76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 511-524 (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).
- 张萍萍,孙军,车钦,等,2018.2016年湖北梅汛期一次极端强降雨的气象因子异常特征分析[J].气象,44(11):1424-1433. Zhang P P, Sun J, Che Q, et al, 2018. Analysis on abnormal characteristics of meteorological factors during an extremely heavy rainfall in 2016[J]. Meteor Mon, 44(11): 1424-1433 (in Chinese).
- 张霞,杨慧,王新敏,等,2021.“21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J].大气科学学报,44(5):672-687. Zhang X, Yang H, Wang X M, et al, 2021. Analysis on characteristic and abnormality of atmospheric circulations of the July 2021 extreme precipitation in Henan[J]. Trans Atmos Sci, 44(5): 672-687 (in Chinese).
- Barnes H C, Houze R A Jr, 2014. Precipitation hydrometeor type relative to the mesoscale airflow in mature oceanic deep convection of the Madden-Julian Oscillation[J]. J Geophys Res: Atmos, 119(24): 13990-14014.
- Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al, 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis[J]. J Atmos Sci, 60(2): 354-365.
- Chen G, Zhao K, Lu Y H, et al, 2022. Variability of microphysical characteristics in the “21·7” Henan extremely heavy rainfall event[J]. Sci China Earth Sci, 65(10): 1861-1878.
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[M]// Doswell C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society: 481-525.
- Wei P, Xu X, Xue M, et al, 2023. On the key dynamical processes supporting the 21.7 Zhengzhou record-breaking hourly rainfall in China[J]. Adv Atmos Sci, 40(3): 337-349.
- Williams E, Stanfill S, 2002. The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity[J]. C R Phys, 3(10): 1277-1292.

(本文责编:何晓欢)