

北京“25·7”极端暴雨时空特征及形成机制分析

雷蕾^{1,2} 邢楠² 李桑² 李京南³ 张琳娜² 吴宏议² 刘瑞婷⁴ 宋林焯⁴

1. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081
2. 北京市气象台, 北京 100097
3. 北京大兴区气象局, 北京 102699
4. 北京城市气象研究院, 北京 100089

摘要: 2025年7月23–29日(简称“25·7”)北京出现极端暴雨。本文基于多源观测、ERA5再分析、北京睿思和睿图临近数值预报系统高分辨率格点分析等资料,对北京“25·7”极端暴雨的时空特征、成因等进行分析。结果表明:此次过程发生在西太平洋副热带高压(简称副高)较常年显著偏西偏北、偏强的环流背景下,副高南侧热带系统活跃;大气低层暖异常,925hPa有水汽通量正距平、北京北部和东部为显著增强的水汽辐合区,具备高温、高湿和高CAPE的环境条件。过程降水具有持续时间长、累计雨量大、夜发性、局地性和极端性等特点。根据降水逐日演变情况,可将此次过程分为四个阶段,四个阶段也恰对应副高588 dagpm位置的摆动。极端暴雨出现在第二和第三阶段,集中在北部山区,具有“面弱点强”的特征,伴有极端短时强降水。重点对这两个阶段进行分析,发现第二阶段降水回波具有后向对流触发和“列车效应”特征,持续4~5h,暴雨出现在海拔200~600m;而第三阶段表现为带状回波内不断有对流生消,持续十几小时,暴雨主要位于海拔300m以下。进一步的成因分析表明,第二和第三阶段都具备有利于产生极端暴雨的动力和地形条件,中尺度低空急流出口区、边界层南风 and 东南风辐合以及山区喇叭口地形、迎风坡等条件相配合,造成局地深厚的辐合和上升运动;差异在于第二阶段是暖区暴雨,边界层南风急流的出口区位于北部浅山区,沿山一线低层辐合有利于对流不断触发,“列车效应”造成极端暴雨;而第三阶段有弱冷空气影响,极端暴雨与切变线和中尺度低涡南侧的动力辐合有关。据此,建立了“25·7”极端暴雨概念模型。

关键词: 极端暴雨, 副热带高压, 中尺度急流, 列车效应, 地形

P456,P458

10.7519/j.issn.1000-0526.2026.051303

Temporal-Spatial Characteristics and Formation Mechanisms of the July 2025 Extreme Torrential Rain in Beijing

灾害天气科学与技术全国重点实验室开放课题(2025KFA02),国家自然科学基金面上项目(42375020),中国气象局复盘总结专项(FPZJ2026-002),中国气象局“首都气象精准预报”青年创新团队(CMA2023QN10),中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J018)共同资助。

第一作者: 雷蕾, 主要从事天气预报以及强对流、暴雨预报技术与机理研究.E-mail: lelei_bjt@126.com

LEI Lei^{1,2} XING Nan² LI Sang² LI Jingnan³ ZHANG Linna² WU Hongyi² LIU Ruiting⁴ SONG

Linye⁴

1 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology (LaSW), Beijing 100081

2 Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100097

3 Daxing Meteorology Office of Beijing City, Beijing102699

4 Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: From 23 to 29 July 2025, extreme torrential rain occurred in Beijing. Based on multi-source observation data, ERA5 reanalysis data, RISE and RMAPS-NOW high-resolution grid analysis data, this paper analyzes the characteristics of rainfall stages, the temporal-spatial features and causes of this event. The results show that the July 2025 extreme torrential rain occurred under a stable circulation background where the subtropical high was significantly westward and northward and stronger than usual, with active tropical systems on its southern side. The lower atmosphere had warm anomalies, with a positive water vapor flux anomaly at 925 hPa and a significantly enhanced water vapor convergence zone in northern and eastern Beijing, creating conditions of high temperature, high humidity and high CAPE. This extreme rainfall process was featured with long duration, much more accumulated precipitation, nocturnal occurrence, localization and extremity. According to the daily evolution of precipitation, the whole process is divided into four stages, corresponding to the swing of the 588 dagpm position of the subtropical high. Extreme torrential rain occurred in Stage 2 and Stage 3, concentrated in the northern mountainous areas of Beijing, featuring a "weak overall but strong locally" pattern, and also accompanied by hourly extreme severe rainfall. The focus analysis on this two stages indicate that, the radar echoes in Stage 2 showed obvious backward triggering and "training effect" characteristics, lasting 4-5 h with severe rainfall occurring at altitudes of 200-600 m. However, in Stage 3 there were continuous generation and dissipation of convection within banded echoes, lasting more than ten hours, with the occurrence of torrential rain mainly below the 300 m altitude. Further analysis on the causes show that both the Stage 2 and Stage 3 had favorable dynamic and topographic conditions, including the exit area of the meso-scale low-level jet, the convergence of southerly and southeasterly winds in the boundary layer, as well as the horn-shaped terrain and windward slopes of the mountains. The difference between two stages are that it was warm-sector rainstorm in the Stage 2, during which the exit area of southern boundary-layer jet was in the northern shallow mountains, the low-level convergence along the mountains was conducive to continuous triggering of convection, and the "training effect" caused the occurrence of extreme rainfall. While the Stage 3 was influenced by a weak cold air and was related to dynamic convergence on the southern side of a shear line and a meso-scale low vortex. Accordingly, the conceptual model of the July 2025 extreme torrential rain is established.

Key words: extreme torrential rain, subtropical high, meso-scale jet, training effect, terrain

引言

近年来华北地区强降水呈现频发多发的特征,北京地区先后出现了2012年7月21日(简称“7·21”)、2016年7月19-20日(简称“16·7”)、2018年7月16日(简称“7·16”)、

2021年7月20日（简称“21·7”）、2023年7月29-31日（简称“23·7”）和2025年7月23-29日（简称“25·7”）等极端暴雨事件，间隔时间仅2~4年。朱连华等（2023）研究表明，全球增暖背景下大气低层增温增湿，极端降水的发生概率将显著增加，重现期大幅缩短。

大量的研究表明，极端暴雨是异常的气候背景、稳定形势下多尺度天气系统相互作用、异常的动力、水汽和能量等环境条件、复杂地形强迫、有利的云物理等条件完美配合所形成。区域性极端暴雨的发生与多尺度的天气系统相互作用的影响关系已经被证实有直接关系（陶诗言，1980；丁一汇等，1980；Yin et al, 2022；赵嘉诚等，2023；孙继松，2025；柳龙生等，2025；Gu J et al, 2025）。华北暴雨有利的天气背景包括西太平洋副热带高压（以下简称副高）和低涡、低槽形成的“西低东高”的形势，冷锋（如“7·21”）（孙继松等，2012；孙建华等，2013），气旋（如“16·7”）（雷蕾等，2017），北上台风低压或者台风远距离影响等（如“21·7”“23·7”）（冉令坤等，2021；张芳华等，2023；陈涛等，2024），以及与上述系统配合出现的天气尺度低空急流显著增强，使得大范围上升运动的强度增加并持续较长时间、主导大范围的水汽输送和强烈辐合（杨晓亮等，2024）。而天气尺度背景下，中尺度低涡、边界层辐合线、地形抬升等也起到了重要的对流触发和降水增幅作用，并且对于暴雨的极值中心位置起决定作用（谌芸等，2012；杨晓亮等，2023）。此外，导致极端暴雨的中尺度对流系统的活动发生在异常高能、高湿的环境条件（雷蕾等，2020；符娇兰等，2023；Lv et al, 2025），雷达回波表现出低质心海洋性或者海洋性和大陆性混合的特征（符娇兰等，2023；陈涛等，2024）。在低空急流影响下，对流风暴的“列车效应”容易导致出现极端降水（孙继松等，2013；Luo and Du, 2023；荆浩等，2024），例如“21·7”（郑州最大雨强达到 $209 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ）、“23·7”（北京最大雨强为 $126.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ）、“16·7”（北京西白莲峪站4h降水量超过280 mm）均受到准静止对流系统的影响。另外，华北极端暴雨多发生在太行山和燕山山区或山麓地带（陶诗言，1980；孙继松等，2012；雷蕾等，2017；2020；苏爱芳等，2021；荆浩等，2024），复杂地形也已被证实对极端暴雨有显著增幅作用。

2025年7月23-29日，京津冀地区出现持续性暴雨（陈双等，2026），局地日降水量连续六天超过200 mm、连续三天超过300 mm，最大累计降水量为650.1 mm（河北兴隆六道河站），最大小时降水量为125.6 mm。主雨带呈西南-东北走向，位于河北保定-北京房山、密云、平谷-河北兴隆一线。暴雨引发了海河区域性大洪水，其中潮白河出现1959年以来最大洪水，北京密云水库出现建库以来最大入库流量（包红军等，2026），山洪、泥石流和山体滑坡造成山区基础设施严重损毁、部分村落交通中断、电力通讯受损和重大人员伤亡。对

于此次过程的最大降水量和落区，主客观预报均出现了较大偏差。本文针对北京“25·7”极端暴雨过程的特征和成因进行初步分析，以期对“七下八上”主汛期副高边缘暴雨预报提供新认识。

1. 资料和方法

使用区域自动站小时降水资料，分析北京降水阶段性和空间分布特征。使用逐 6min 京津冀多波段组网雷达回波拼图和北京 5min 降水资料，分析极端暴雨回波和分钟级降水演变特征。使用高空观测以及欧洲中期天气预报中心 ERA5 逐时再分析数据，分析大尺度环流背景和对流环境条件。使用北京睿思(RISE)系统三维风场、北京睿图临近数值预报(RMAPS-NOW)系统扰动温度、三维风场和垂直速度等格点分析资料，研究造成极端暴雨的中小尺度热动力条件。

RISE 系统是北京“百米级、分钟级”多源数据快速融合预报系统，可提供逐 10min 更新的北京地区 100m 分辨率/京津冀及周边 500m 分辨率的温度、湿度、风和降水等格点三维分析数据等(陈明轩等, 2025)。RMAPS-NOW 系统基于快速更新循环四维变分同化技术和三维数值云模式(陈明轩等, 2016)，现已融合 10 部多波段天气雷达和 3000 多个区域自动站观测，可提供逐 6 min 更新的京津冀 1 km 分辨率的大气三维动力、热动力、水凝物的三维分析数据等。

2. 北京降水实况和特征

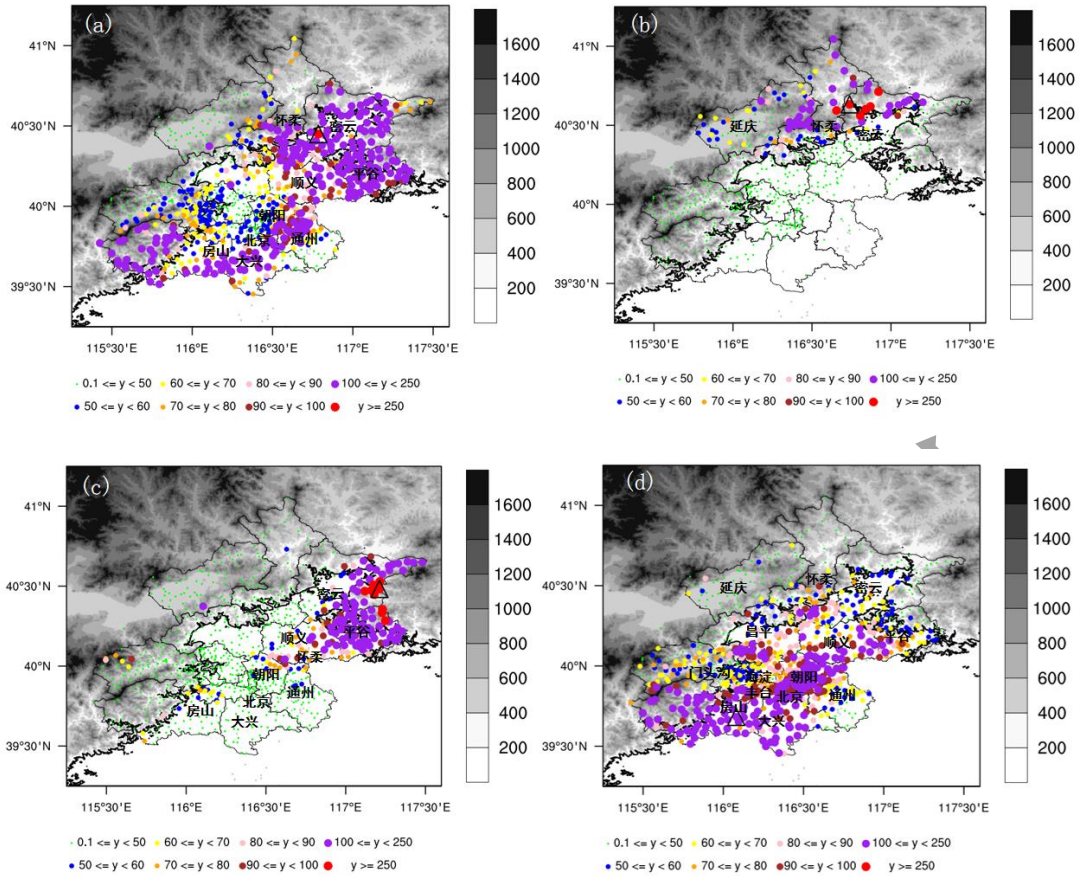
北京“25·7”极端暴雨期间(2025 年 7 月 23 日 08:00 至 29 日 11:00; 北京时, 下同)，全市平均的过程降水量为 211.1mm，最大达 574.3 mm(密云郎房峪站)，250 mm 以上降水主要位于西南部和东北部，400 mm 以上降水高度集中于东北部山区(图 1)，其中 12 个站超过 500 mm。除了持续时间长、累计雨量大、强降水集中在北部山区外，此次过程还具有夜发性、局地性、极端性等特点。

“25•7”	2025年7月23日 08:00至29日 11:00	147	211.1	574.3	95.3	224.8	291.0
“23•7”	2023年7月29日 08:00至8月2日 08:00	83	331.0* 272.1	1025.0* 879.5	126.6* 114.2	226.3	269.8
“7•16”	2018年7月15日 20:00至18日 06:00	58	103.1	386.0 [‡] 351.3	117.0	247.8	287.4
“16•7”	2016年7月19日 01:00至21日 08:00	55	212.6	453.7	56.8	140.7	243.6
“7•21”	2012年7月21日 08:00至22日 08:00	20	170.0	541.0 [‡]	100.3	213.1	300.2
“6•23”	2011年6月23日 08:00至24日 08:00	18	50.0	214.9	128.9	182.0	192.6

注：上标*为北京规划和自然资源委员会（地质灾害专业监测网）雨量站数据，上标[‡]为水文站数据，未标注的均为气象站数据。

2.2 阶段性、夜发性、局地性

按照北京降水的逐日演变情况，此次过程可分成四个阶段（图 2）。第一阶段：23 日 08:00 至 26 日 08:00；第二阶段：26 日 08:00 至 27 日 08:00；第三阶段：27 日 08:00 至 28 日 14:00；第四阶段：28 日 14:00 至 29 日 11:00；各阶段降水情况见表 2。第一和第四阶段全市平均降水量大（达到 70 mm 以上）、暴雨范围广（图 2a, 2d），但雨强总体不强，以一般性短时强降水（ $20\sim 50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ）为主，短时强降水造成的降水量仅占该时段全市总降水量的 50%左右。第二和第三阶段降水“面弱点强”、分布极不均匀（图 2b, 2c），尤其是在第二阶段，北京东南部无降水，而相距约 60km 的北部山区局地累计降水却超过了 300 mm，多个站的 3h 降水量超过 150 mm。



注：图中黑色三角标注各阶段最大降水量。

图2 北京“25·7”极端暴雨四个阶段的累计降水量（彩色圆点）空间分布叠加地形（灰色阴影）

(a) 第一阶段：23日08:00至26日08:00, (b) 第二阶段：26日08:00至27日08:00,

(c) 第三阶段：27日08:00至28日14:00, (d) 第四阶段：28日14:00至29日11:00

Fig.2 Spatial distribution of accumulated precipitation (colored dot) in four stages of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing superimposed with terrain (grey shadow)

(a) Stage 1: 08:00 BT 23 to 08:00 BT 26 July, (b) Stage 2: 08:00 BT 26 to 08:00 BT 27 July,

(c) Stage 3: 08:00 BT 27 to 14:00 BT 28 July, (d) Stage 4: 14:00 BT 28 to 11:00 BT 29 July, 2025

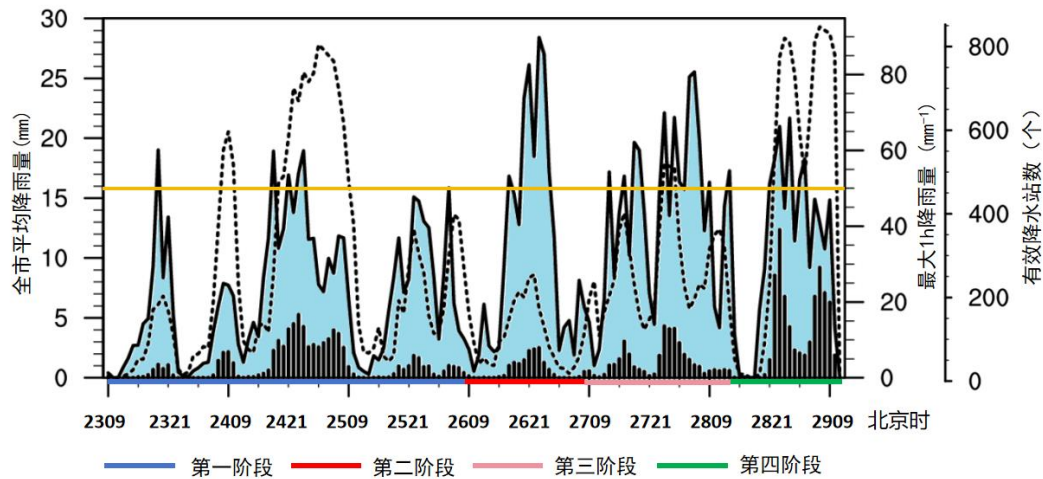
表2 北京“25·7”极端暴雨四个阶段降水量对比

Table 2 Comparison of precipitation in four stages of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

统计量	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
全市平均降水量 /mm	78.3	20.7	39.0	73.1
最大降水量/mm , 站名	258.9, 密云坟庄站	315.7, 密云黄土梁站	326.3, 密云干峪沟站	196.7, 房山阎村站
累计降水量≥ 250mm的站数	1	6	9	0
最大1h 降水量/mm, 时间(BT)	60.1, 23日18:00-19: 00	95.3, 26日22:00-23: 00	79.4, 28日04:00-05: 00	68.5, 29日00:00-01: 00

由全市平均降水量的逐小时演变（图 3）可见，降水多出现在夜间，呈现夜发性特征。第一和第四阶段的夜间降水均为双峰分布，半夜雨势有所减弱，后半夜再次加强，其中第四阶段夜间为整个过程全市平均降水最强时段。第二和第三阶段的夜间降水均为单峰分布。

从最大雨强和降水站数的变化（图 3）来看，第二和第三阶段凸显局地强降水特征：最大雨强大，但降水站数少，其中第二阶段仅 200 个站左右（占比不足 25%）；而第一和第四阶段最大雨强稍弱，但降水站数多，超过 600 个站（占比 80%以上）。进一步分析第二和第三阶段雨强的逐时变化（图 4）。第二阶段：持续 6h 雨强超过 $\geq 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，累计 3h 雨强超过 $\geq 80\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，出现极端雨强的站次也更多，短时强降水对累计降水量的贡献率最大可达 80%以上；第三阶段：持续 6h（累计 12h）雨强超过 $\geq 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，但出现极端雨强的站次较少，大多数站次为一般性短时强降水（ $20\sim 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ），短时强降水对累计降水量的贡献率最大为 60%左右。



注：黄色横线为雨强 $50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 3 北京“25·7”极端暴雨四个阶段的全市平均降水量（柱状）、有效降水站数（虚线）和单站最大雨强（实线填色）的逐时变化

Fig.3 Hourly variations of the city-wide average precipitation (column), number of effective precipitation stations (dashed line), and maximum rain intensity at a single station (solid line) in the four stages of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

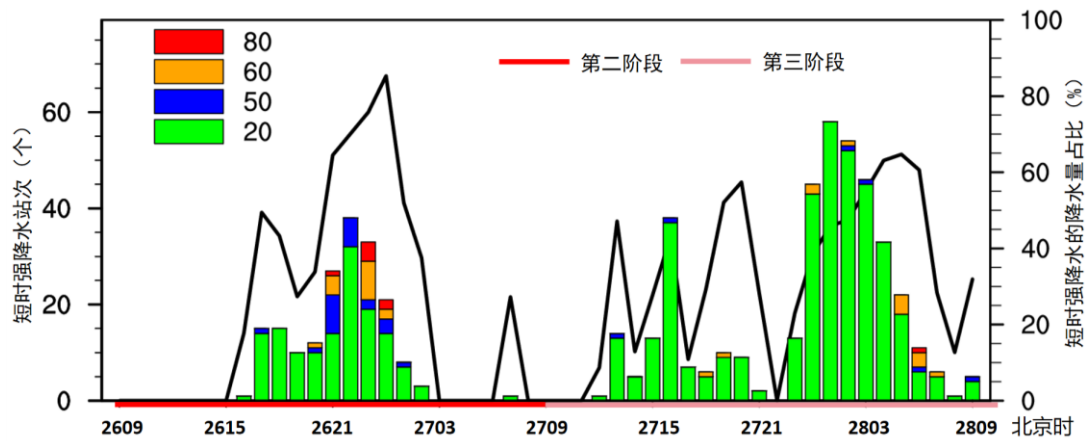


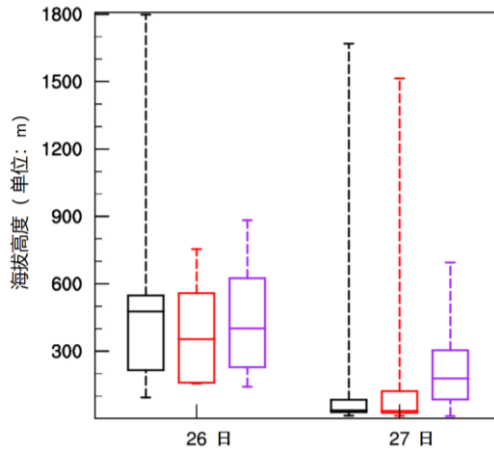
图4 第二和第三阶段出现不同强度短时强降水的站次(柱状)和短时强降水对累计降水量贡献率(实线)的逐时变化

Fig.4 Hourly variations for the station-number (column) of different short-time severe precipitation intensities, and the contribution rate of short-time severe precipitation to accumulated precipitation (solid lines) in Stage 2 and Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

2.3 暴雨空间分布、精细对流与分钟级降水演变特征

2.3.1 暴雨空间分布和海拔高度

第一和第四阶段暴雨沿太行山呈西南—东北带状走向,分布在平原和浅山区(图2a, 2d)。第二阶段累计降水量50~100 mm出现在延庆和怀柔区的山麓一带,100 mm以上大暴雨集中于延庆和怀柔交界、怀柔和密云交界的北部山区(图2b),海拔主要在200~600 m(25%~75%分位),暴雨和大暴雨所在的海拔高度差异不大(图5)。第三阶段累计降水量50~100 mm分布在顺义和平谷,更靠近平原(图2c),海拔大多在100 m以下;而100 mm以上大暴雨沿西南引导气流更靠近下风方向的平谷和密云的山区,海拔约100~300 m(图5)。整体对比,第二阶段暴雨出现的海拔高于第三阶段(图5)。此外,从雨强来看,第二和第三阶段 $\geq 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水多发于海拔300 m附近,次发在海拔600 m附近(图略)。



注：图中，黑色、红色、紫色，分别代表降水量为 $[50, 80)$ $[80, 100)$ $[100, +\infty)$ mm；箱线图中触须的上下端分别代表统计最大和最小值，箱体内部三条绕线自下而上分别代表第 25%、50%和 75%分位值。

图 5 北京“25·7”极端暴雨第二和第三阶段累计降水量与站点海拔高度分布

Fig.5 Elevation distribution of accumulated precipitation with ranges of 50–80 mm (black), 80–100 mm (red) and ≥ 100 mm (purple) in Beijing in Stage 2 and Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

2.3.2 精细对流与分钟级降水演变

第二阶段极端降水主要出现在 26 日前半夜（20：00 至 27 日 00：00）。26 日下午 14:00–18:00，北部山区及山前出现分散对流生消发展。18:00–20:00，平原触发分散对流向北移动，合并到北部对流中，形成带状多单体对流系统(图 6a, 6b)。回波强度在 50~55 dBz，质心低，有差分反射率 (Z_{DR}) 柱和差分传播相移率 (K_{DP}) 柱，径向速度 2km 高度以上出现西南急流 ($15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，图略)。20:00–23:30，多单体合并和组织化，北部昌平–怀柔–密云的山麓出现后向对流触发和“列车效应”(图 6b~6e)。西南风风速增强到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ， 0.5° 仰角局地出现中 γ 涡旋辐合，雨带上有多 Z_{DR} 和 K_{DP} 柱、 K_{DP} 最大达 $7 \sim 20^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ (图 7b~7d)。该期间 5min 最大雨量持续在 10 mm 左右，最大达 23 mm (密云溪翁庄站)，最大小时降水量猛增至 70~100 mm(图 3)，累计降水量最大值出现在密云水库西北侧的山麓上。历史上，“75.8”暴雨板桥水库附近的迎风坡和喇叭口地形附近也出现了持续时间极长的短时强降水(陶诗言, 1980)。23:30 之后，深厚的天气尺度急流增强，对流系统向北移动，极端降水逐渐结束。

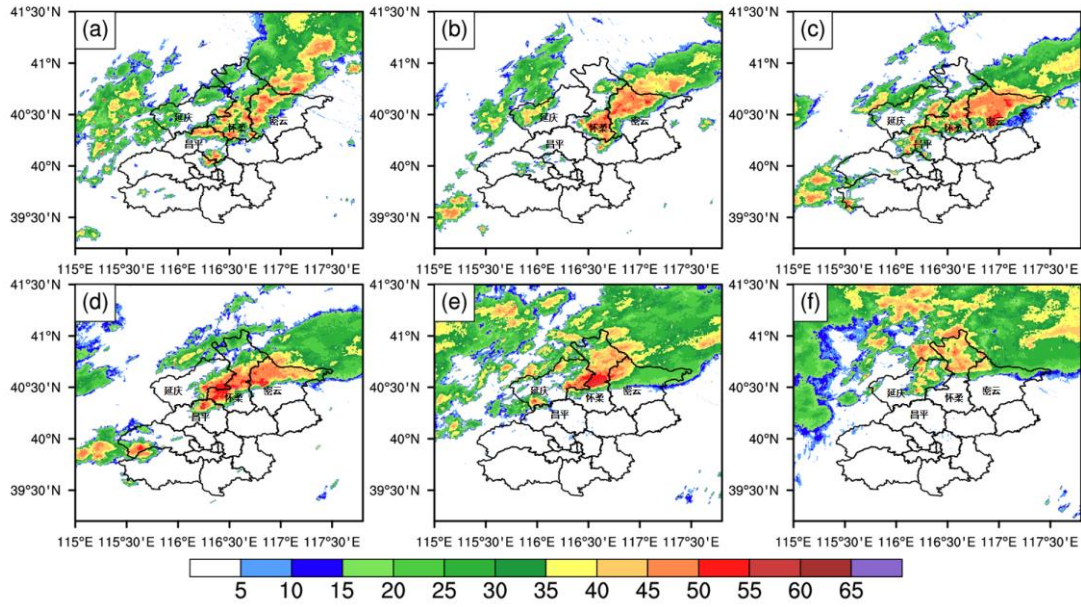
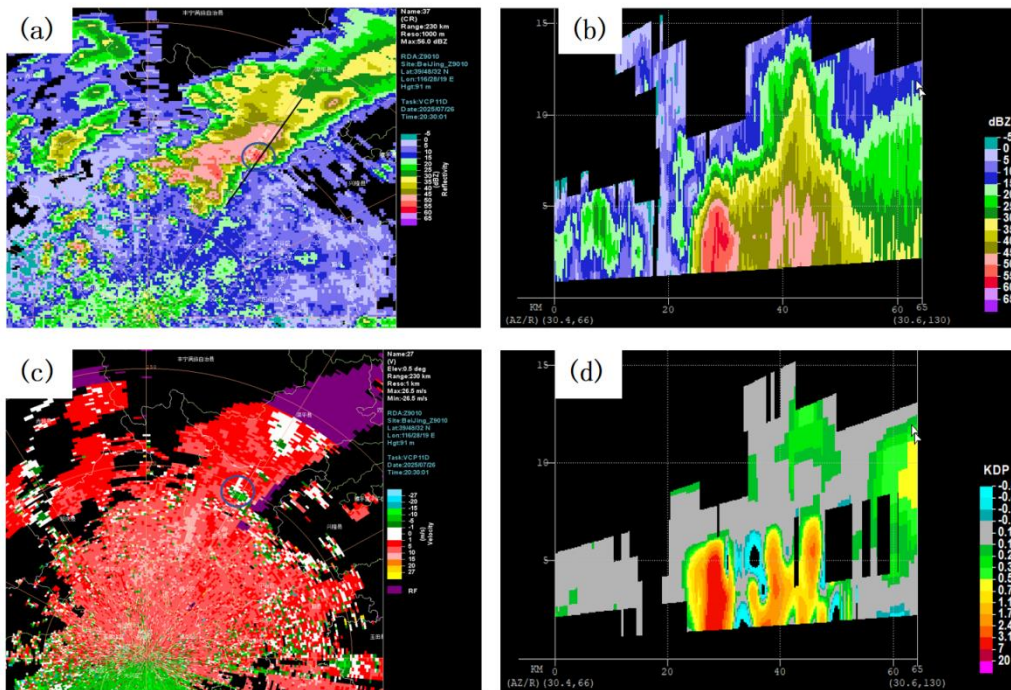


图6 北京“25·7”极端暴雨第二阶段雷达组合反射率因子演变

(a. 26日 18:36, b. 26日 20:00, c. 26日 21:00, d. 26日 22:00, e. 26日 23:48, f. 27日 00:48) (后期植字入图中)

Fig.6 Evolution of radar composite reflectivity factor in Stage 2 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing



注：圆圈内为出现分钟级降水极大值的密云溪翁庄站。

图7 北京“25·7”极端暴雨第二阶段7月26日20:30北京观象台雷达(a)组合反射率因子(单位: dBZ), (c) 径向速度(单位: $m \cdot s^{-1}$), (b) 回波强度(单位: dBZ),和(d) K_{DP} (单位: $^{\circ} \cdot km^{-1}$) 沿图7a中黑线的垂直剖面(过强降水中心)

Fig. 7 Radar (a) composite reflectivity factor(unit:dBZ), (c) radial velocity(unit: $m \cdot s^{-1}$), cross-sections of (b) echo intensity(unit:dBZ) and (d) K_{DP} (unit: $^{\circ} \cdot km^{-1}$) at the Beijing Observatory at 20:30 BT in Stage 2 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

第三阶段，切变线缓慢南压、副高南退，冷暖空气结合触发带状对流，对流单体不断生消并自西南向东北移动，回波带稳定少动、持续十余小时，但是最大 5min 降水量和最大小时降水量整体较第二阶段弱。27 日午后，平原多单体分散对流影响，最大 5min 降水量基本为 6~10 mm；夜间带状对流发展（图 8a, 8b），5min 降水量超过 10 mm 的站点增多。28 日凌晨起，带状对流减弱东移，但平原地区分散对流不断触发并向东北方向移动（图 8c, 8d），5min 降水量超过 10 mm 的时段增多、最大达 13.3 mm，最大 1h 降水量为 79.4 mm；2 日上午，虽然仍有分散对流影响和后向触发特征（图 8e, 8f），但最大 5min 降水量不足 10 mm，最大 1h 降水量也由 60 mm 左右降至不足 15 mm；中午，对流减弱移出（图 8f），降水结束。在此期间，带状回波上同样存在多个回波柱，但 K_{DP} 值较第二阶段弱，最大在 $2^{\circ} \cdot km^{-1}$ 左右（图 9b, 9d）。西南风较前一日明显减弱，径向速度上仅短时间可见西南风急流爬升（图 9c，与平谷风廓线观测一致），山区近地面有弱风速辐合。

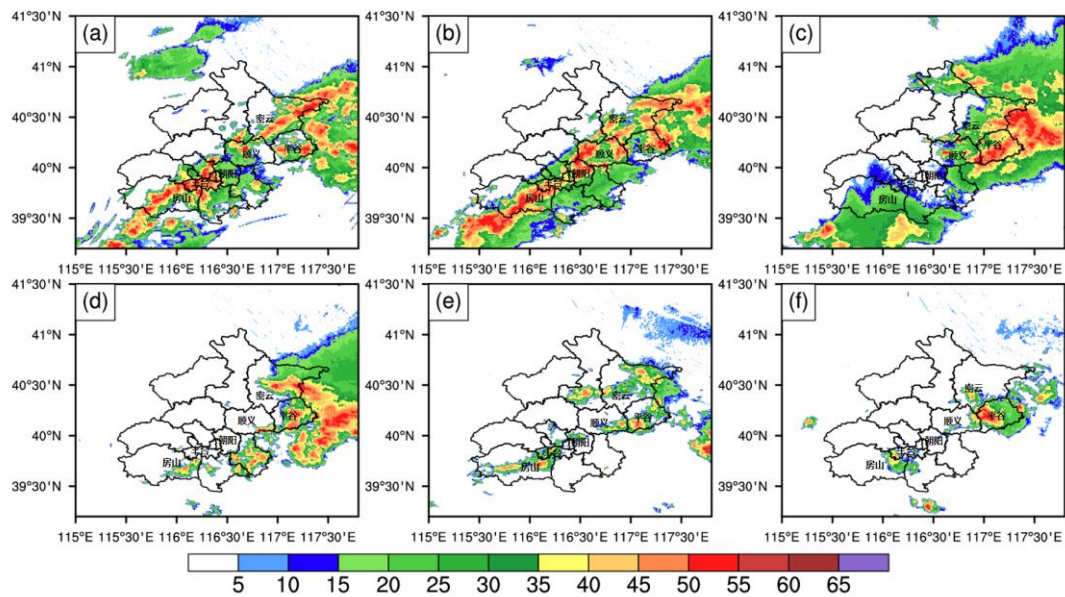


图 8 北京“25·7”极端暴雨第三阶段雷达组合反射率因子演变

(a. 27 日 23:00, b. 27 日 23:48, c. 28 日 03:00, d. 28 日 06:30, e. 28 日 09:42, f. 28 日 12:00) (后期植字入图中)

Fig.8 Evolution of radar composite reflectivity factor in Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

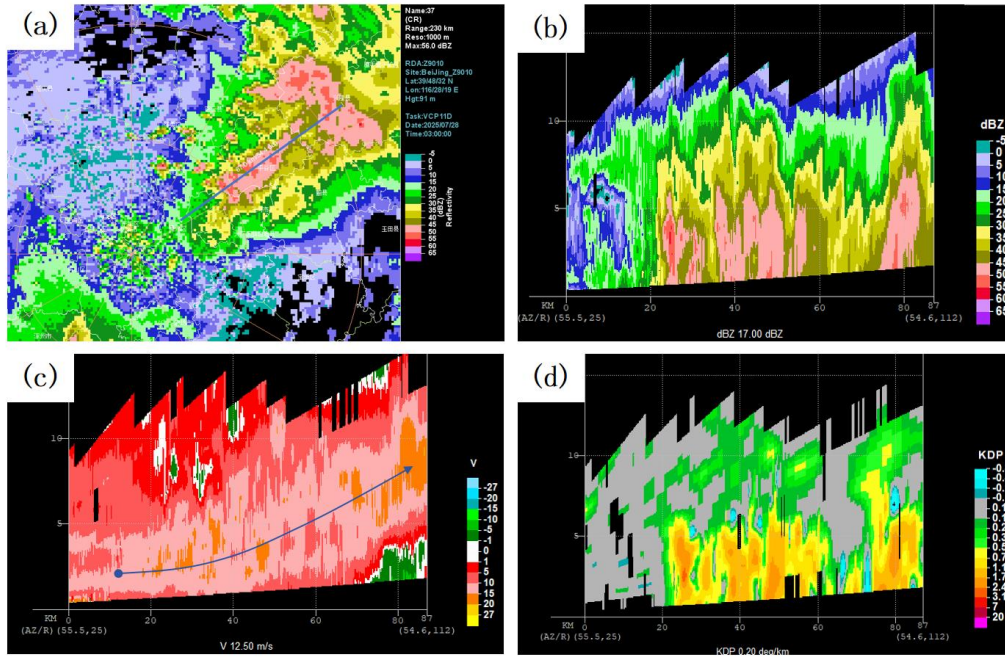


图9 北京“25·7”极端暴雨第三阶段7月28日03:00北京观象台雷达(a)组合反射率因子(单位: dBZ), (c) 径向速度(单位: $m \cdot s^{-1}$), (b) 回波强度(单位: dBZ) 和 (d) K_{DP} (单位: $^{\circ} \cdot km^{-1}$) 沿图9a中蓝线的垂直剖面(过短时强降水极值站)

Fig. 9 Radar (a) composite reflectivity factor(unit:dBz), (c) radial velocity(unit: $m \cdot s^{-1}$), cross-sections of (b) echo intensity(unit:dBz) and (d) K_{DP} (unit: $^{\circ} \cdot km^{-1}$) at the Beijing Observatory at 03:00 BT in Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

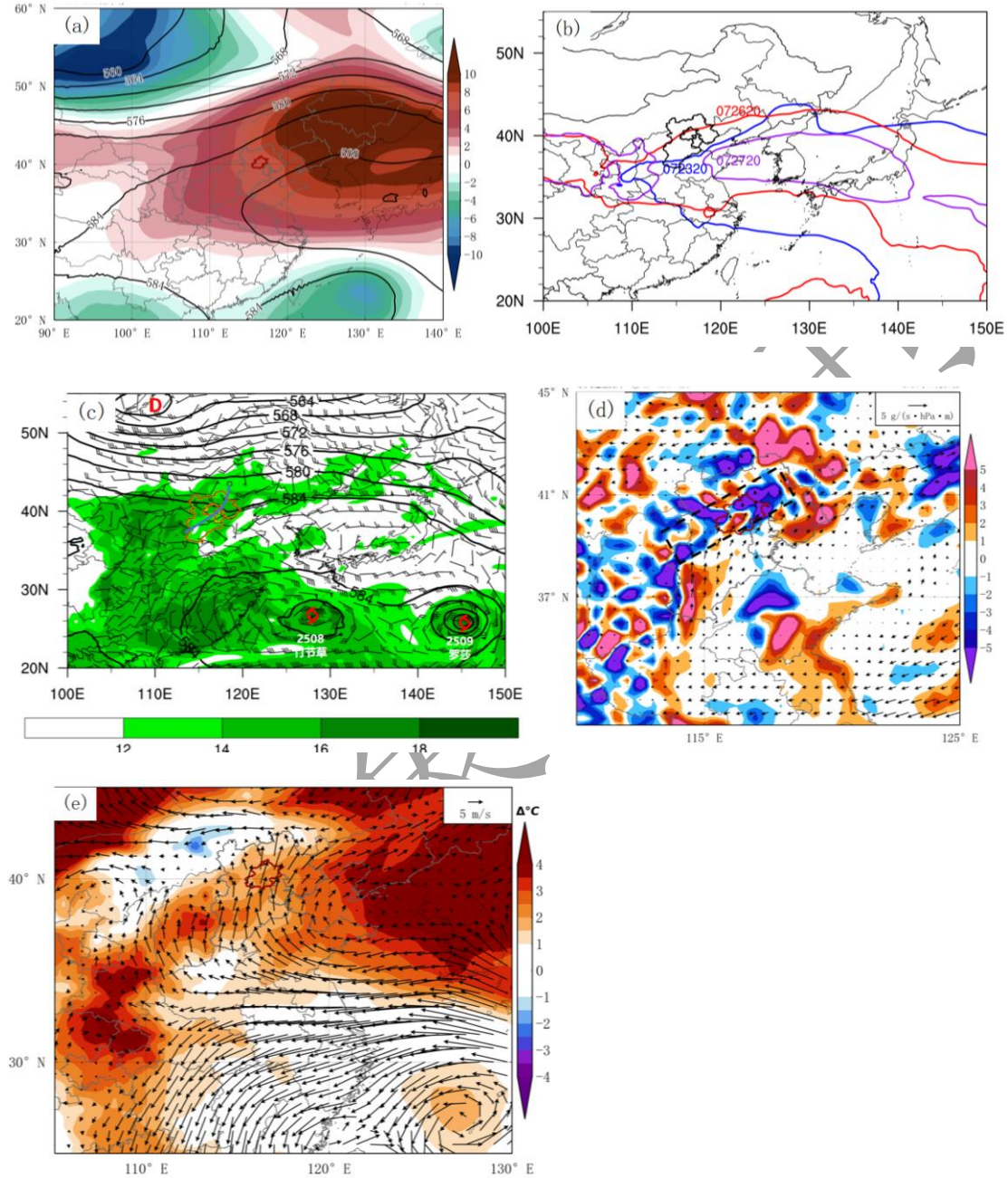
3. “25·7”极端暴雨成因

3.1 稳定的环流形势和副高异常

这次持续性强降水发生在稳定的大尺度环流形势下。由图10a可见, 500 hPa 中高纬为“东高西低”的形势, 低涡、低槽位于 $90^{\circ} E$ 附近, 我国东部长江以北地区至日本海受强大副高控制, 副高西段脊线位于 $35^{\circ} N$ 附近、中心在 $135^{\circ} E$ 附近, 588 dagpm 北界达到 $42^{\circ} N$ 。位势高度距平显示副高较常年显著偏西偏北(西段脊线较常年同期偏北 6°), 强度偏强 10 dagpm 以上, 为 1961 年以来历史同期第四强。副高南侧热带系统活跃, 台风“范斯高”“竹节草”“罗莎”于 7 月 22-24 日在西北太平洋洋面先后生成, 台风北侧、副高南侧的强盛偏东风有利于水汽向内陆输送(图 10c)。

降水的四个阶段恰对应副高 588 dagpm 线位置的摆动(图 10b)。第一阶段, 588 dagpm 线先北抬后南退, 京津冀地区处于副高西北侧边缘, 925 hPa 京津冀平原为南风的水汽通量正距平(图略), 在副高边缘西南急流、近地面偏东风和地形影响下出现第一阶段明显降雨。第二阶段, 588 dagpm 线西伸北抬至北京边缘, 925 hPa 山西中部至北京北部山区的水汽辐合显著增强(图 10d), 同时 850 hPa 出现超过 $1.5^{\circ}C$ 的暖异常(图 10e), 出现暖区极端

暴雨。第三阶段，副高小幅南退，700hPa 有切变线和弱冷空气过境，冷暖空气交汇，水汽强辐合带维持，再次出现极端暴雨。第四阶段，贝加尔湖附近低涡、低槽引导明显冷空气南下，出现全市暴雨。



注：图 d 中矩形框示意太行山北段和燕山强水汽辐合带。

图 10 2025 年 7 月 (a) 23 日 500hPa 位势高度 (等值线) 及距平 (填色) (单位: dagpm), (b) 23-27 日副高 588 dagpm 位置变化, (c) 28 日 08:00 500hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm)、700hPa 风场 (风羽) 和比湿 (填色, 单位: g·kg⁻¹), (d) 26 日 925hPa 水汽通量散度 (填色, 单位: g·(hPa·m²·s)⁻¹) 和水汽通量距平 (箭头, 单位: g·(s·hPa·m)⁻¹), (e) 26 日 850hPa 温度距平 (填色) 和风场距平 (风矢)

Fig.10 (a) Geopotential height (contour) and its anomaly (colored) at 500 hPa on 23 July (unit: dagpm), (b) variation in the 588 dagpm contour position of the subtropical high from 23 to 27 July, (c) geopotential height

(contour, unit: dagpm) at 500 hPa and wind field (barb) and specific humidity (colored, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) at 700hPa at 08:00 BT 28 July, (d) water vapor flux divergence (colored, unit: $\text{g}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$) and water vapor flux anomaly (vector, unit: $\text{g}\cdot(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{m})^{-1}$) at 925hPa on 26 July, and (e) temperature anomaly (colored, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind field anomaly (vector) at 850hPa on 26 July 2025

3.2 高温、高湿、高 CAPE 的不稳定大气条件

7月24–28日，北京地区对流有效位能 (CAPE) (图 11a)、整层可降水量 (PW) (图 11b) 等均有明显增大。CAPE 超过 $1600\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的大值区由 35° N 北推至 $38\sim 39^{\circ}\text{ N}$ ，第一阶段暴雨过后能量短时耗散，但由于低层迅速升温且湿度大，第二阶段降水前能量得以迅速重建。26日、27日的 14:00 北京观象台实况探空表明，CAPE 分别高达 $2455.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 12)、 $3164.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图略)。水汽也自南向北输送，26日 PW 极大值 (70 mm) 北推到 42° N (河北北部) 附近 (图 11b)，且北京地面露点温度高 (25°C)、抬升凝结高度低 (712 m)、暖云层较厚 (约 4 km)、无对流抑制能量 (图 12)，表明对流易被触发且易出现强降水。

第二和第三阶段 850hPa 以下至近地面假相当位温 (θ_{se}) 超过 348 K (图 13)，与华南暖区暴雨的阈值相当 (赵玉春等, 2008)，最大超过 354 K 。第二阶段，平原到浅山区天气尺度的垂直上升运动层次浅薄，仅在 850hPa 以下至近地面 (图 13a)，上升运动中心在 925hPa 附近，与北京“7·16”暖区特大暴雨的环境热动力特征极其相似 (雷蕾等, 2020)。第三阶段则表现为西南风在北京东北部地形处抬升，叠加高空切变线动力抬升作用，因此近地面至 200hPa 有深厚的天气尺度垂直上升运动 (图 13b)，天气尺度的动力强迫较第二阶段强。

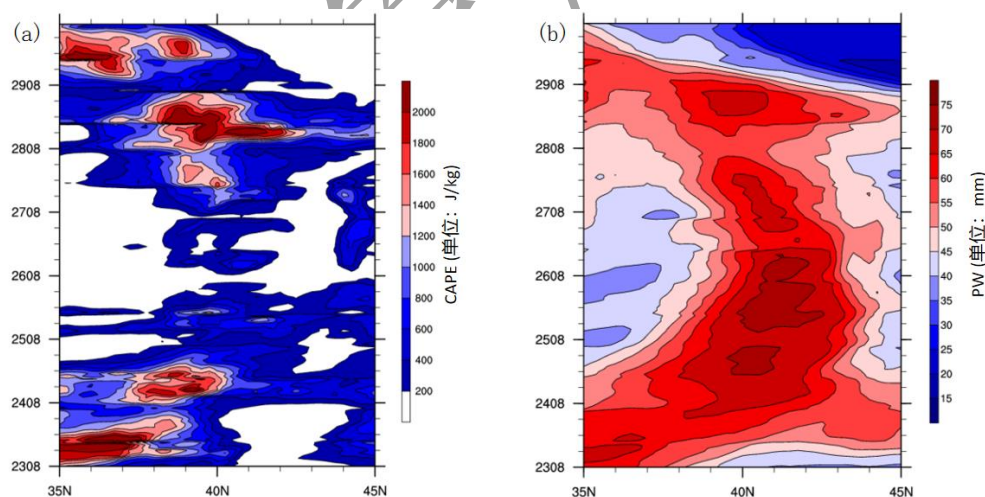


图 11 2025 年 7 月 23—29 日 $114^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{ E}$ 平均的 (a) CAPE 和 (b) PW 的纬度分布逐日变化

Fig.11 Latitude-time variation of (a) CAPE and (b) PW averaged over $114^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{ E}$ from 23 to 29 July 2025

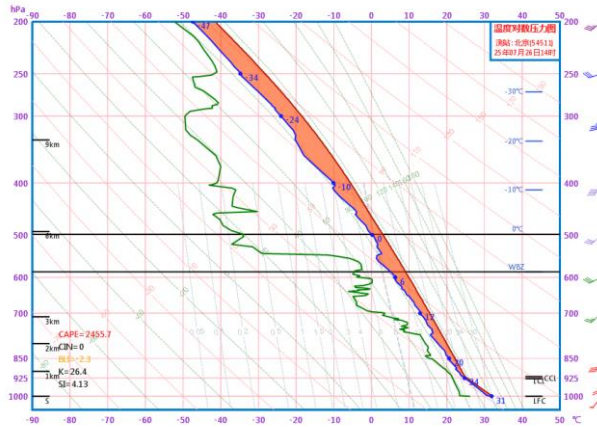


图 12 2025 年 7 月 26 日 14: 00 北京观象台探空

Fig.12 Radiosonde observation at Beijing Observatory at 14:00 BT 26 July 2025

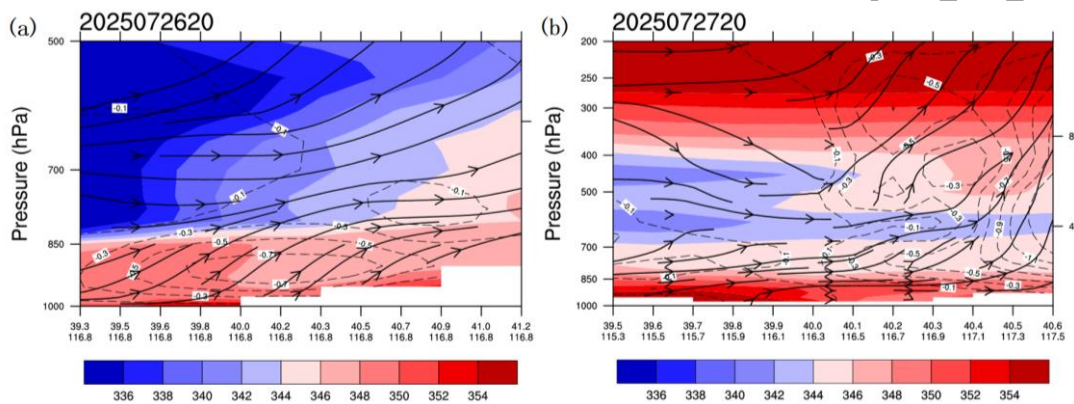


图 13 北京“25·7”极端暴雨 (a) 第二和 (b) 第三阶段假相当位温 θ_{se} (填色, 单位: K)、流场和垂直速度 (虚线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 的垂直剖面

(a) 26 日 20: 00 沿 116.8°E (本阶段最大降水量站点附近), (b) 27 日 20: 00 沿图 1 中虚线 (暴雨雨带)

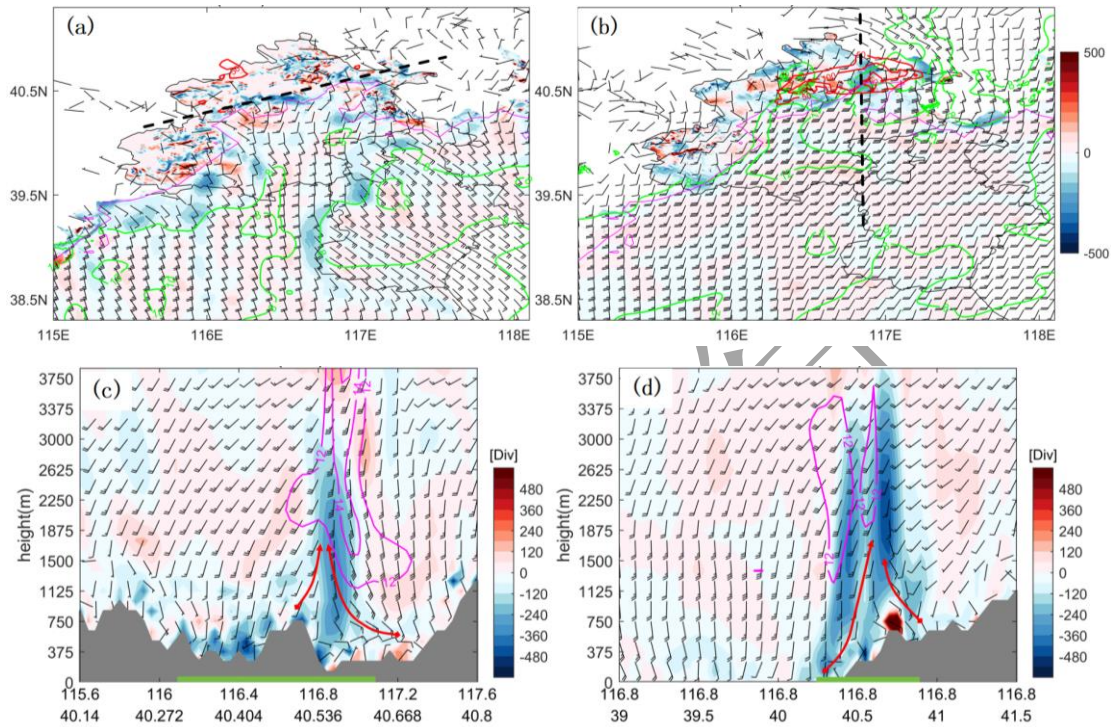
Fig.13 Cross-sections of θ_{se} (colored, unit: K), flow field and vertical velocity (dashed line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08: 00 BT along (a) the meridional direction of 116.8°E near the rainstorm center at Huangtuliang Station in Miyun in Stage 2, and (b) along the dashed line on the rainstorm belt in Fig.1 in Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

3.3 中尺度低空急流、强辐合与地形强迫

研究表明极端降水往往伴随大范围天气尺度低空急流和边界层低空急流的发展和维持 (Du and Chen, 2018; 2019; 雷蕾等, 2020; Luo and Du, 2023; 2025)。但是北京此次过程的第二和第三阶段极端暴雨有所不同, 强降水期间环境风场整体较弱, 仅短时间出现中尺度低空急流。

考虑到 ERA5 再分析资料难以体现中尺度急流特征, 因此利用 RISE 百米分辨率格点风场分析风速的中尺度脉动。第二和第三阶段暴雨前期, 低层西南风分别为 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。第二阶段暴雨发生前 (26 日傍晚), 边界层 500 m 高度上 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区从北京以南、东南渤海湾 (海风锋) 同时向北部山前推进 (图 14a), 南风 and 东南风辐合导致山麓

附近风速增大，出现 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 中尺度低空急流（图 14b~14d）。26 日夜间，急流出口区位于北部浅山区以及密云喇叭口地形附近（图 14b），沿平行于山脉方向（图 14a 虚线）的剖面可见（图 14c），浅山区 750 m 高度以下有强辐合，有利于对流不断触发、在西南气流引导下形成“列车效应”，造成对流系统停滞、暴雨加强；而在极端暴雨的位置有持续南风 and 东南风辐合，辐合厚度达到 3km，垂直风切变增大。其次，过极端暴雨中心垂直于密云喇叭口地形方向（图 14b 虚线），强辐合出现在浅山区迎风坡上（图 14d）。



注：图 a, b 中紫红色细线为 200m 地形高度线，绿色等值线为风速 $\geq 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；图 c, d 中紫红色细线为风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图 14 北京“25·7”极端暴雨第二阶段 7 月 26 日 RISE 系统格点分析资料 (a, b) 风场 (风羽和绿色等值线)、3h 降水量 (红色等值线，单位：mm) 和散度 (填色，单位： 10^{-5}s^{-1}) 水平分布，(c, d) 风场 (风羽和紫红色线) 和散度 (填色，单位： 10^{-5}s^{-1}) 的垂直剖面

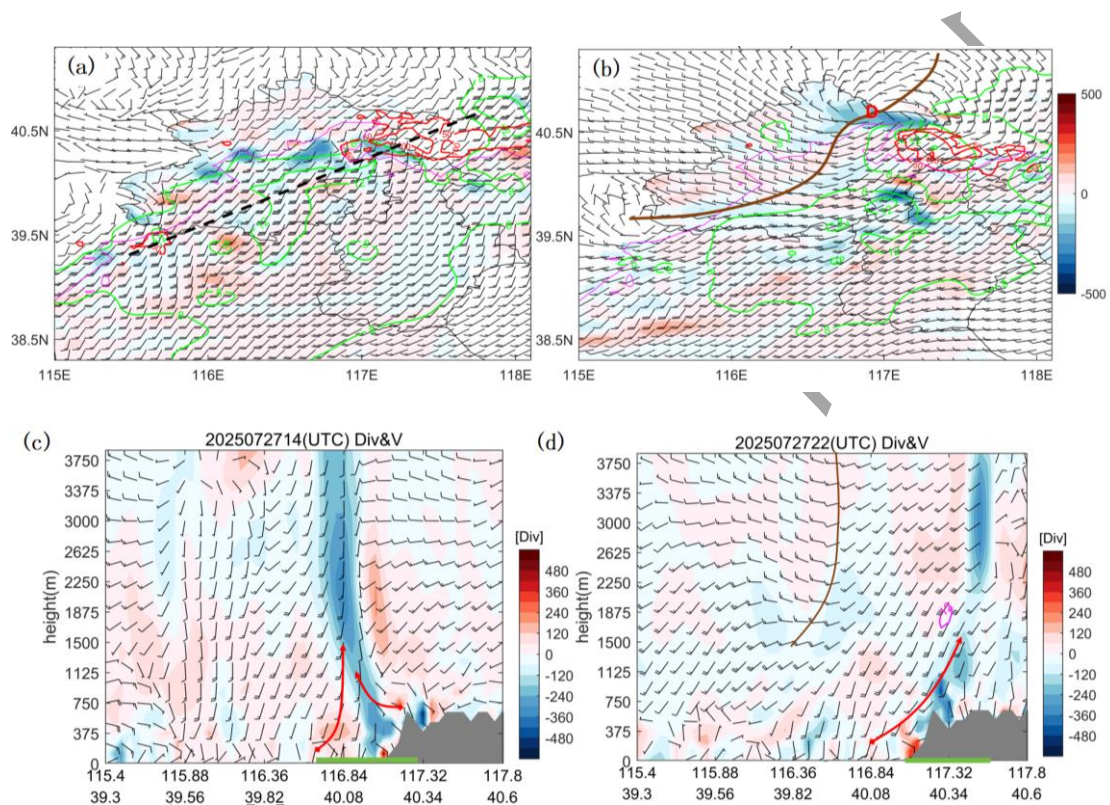
(a) 19: 00 位于 500 m 高度，(b) 23: 00 位于 1000 m 高度，

(c) 20: 00 沿图 14a 中虚线 (平行于地形)，(d) 20: 00 沿图 14b 中虚线 (沿暴雨中心并垂直喇叭口地形)

Fig.14 Grid analysis data from the RISE system in Stage 2 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

(a,b) horizontal distributions of wind field (barb and green contour), 3 h precipitation (red contour, unit: mm) and divergence (colored, unit: 10^{-5}s^{-1}) at (a) 500 m height at 19:00 and (b) 1,000 m height at 23:00 BT 26 July; (c,d) vertical cross-sections of wind field (barb and purple-red line) and divergence (colored, unit: 10^{-5}s^{-1}) at 20:00 BT 26 July along (a) the dashed line in Fig. 14a (parallel to the terrain) and (d) the dashed line in 14b (passing through the rainstorm center and perpendicular to the trumpet-shaped terrain)

27 日夜间，中尺度低空急流出口区位于北京东北部（图 15a），山坡上南风和东南风风速以及辐合均明显较第二阶段弱，但迎风坡山前辐合层厚度仍然超过 3km（图 15c）。辐合区稳定少动、持续时间超过 8h，因此山区受分散对流影响持续时间长，造成极端暴雨。此外，28 日凌晨河北北部切变线南压，RISE 风场分析北京北部山区出现中尺度低涡，极端暴雨位于其东南侧（图 15b），28 日上午随着系统东移，中尺度辐合强度和厚度也明显减弱并东移（图 15d），暴雨逐渐结束。因此，第三阶段极端暴雨不仅与短时间加强的中尺度低空急流和地形强迫抬升有关，也与中尺度低涡切变东南侧辐合有关。



注：图 a, b 中紫红色细线为 200m 地形高度线，绿色等值线 $\geq 8, 10, 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；图 b 中 D 示意中尺度低涡，图 d 中紫红色细线为水平风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，棕色细线为切变线，红色箭头线指示迎风坡附近气流辐合。

图 15 北京“25·7”极端暴雨第三阶段 RISE 系统格点分析资料 (a, b) 2000 m 高度风场（风羽和绿色等值线）、3h 降水量（红色等值线，单位：mm）和散度（填色，单位： 10^{-5}s^{-1} ）水平分布，(c, d) 沿图 15a 中虚线（带状回波和雨带）的风场（风羽和紫红色线）和散度（填色，单位： 10^{-5}s^{-1} ）垂直剖面

(a) 28 日 03: 00, (b) 28 日 06: 00, (c) 27 日 22: 00, (d) 28 日 06: 00

Fig.15 Grid analysis data from the RISE system in Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing

(a, b) horizontal distributions of wind field at the altitude of 2000 m (barb, green contour), 3 h precipitation (red contour, unit: mm) and divergence (colored, unit: 10^{-5}s^{-1}) at (a) 03:00 BT 28 and (b) 06:00 BT 28 July;

(c, d) vertical cross-sections of wind field (barb and purple-red line) and divergence (colored, unit: 10^{-5}s^{-1}) along the dashed line in Fig. 15a (band-shaped echo and rain belt) at (c) 22:00 BT 27 July and (d) 06:00 BT 28 July

3.4 潜热释放的作用

朱乾根 (1979) 的研究揭示了暴雨对垂直上升运动的间接反馈作用, 即暴雨出现后, 其上空中小尺度的对流凝结潜热的释放能显著增强垂直上升运动, 从而反过来造成暴雨的维持和加强。张晓芳和陆汉城 (2006) 对梅雨锋暴雨、雷蕾等 (2017) 对“16·7”等动力过程研究、以及 Guo et al (2014) 对北京“7.21”、Xu et al (2024) 对郑州“21·7”等数值模拟试验, 均证实了潜热加强垂直上升运动从而导致强降水的反馈机制。

第二和第三阶段降水 RMAPS-NOW 三维热动力特征揭示了极端暴雨上空水汽凝结或凝华造成大量的对流潜热释放。分别沿图 14b 和图 15a 的剖面, 分析 26 日和 27 日夜间接扰动温度、垂直速度与对流的空间配置 (图 16) 发现, 强回波 (暴雨区) 上方 3km 以上均出现 5°C 左右的正扰动温度 (即凝结潜热), 中心位于 5~10 km; 对流下方近饱和湿空气中雨滴蒸发出现弱冷池 (地面自动站观测负变温不明显), 冷池前侧梯度小、有弱锋区。一方面, 在局地对流单体尺度上, CAPE 有一定消耗, 积云塔中高层增温、低层蒸发冷却, 层结趋于中性或稳定, 不利于低层对流发展和降水加强; 但是另一方面, 云体内中高层潜热释放造成中上层浮力增大, 对流继续向上发展, 垂直运动加强; 同时低层减压抽吸, 使得平原地区 1.5 km 以下西南风速加大为中尺度急流 (图 16a), 能量和水汽源源不断向山前输送, 又促进了耗散能量的重建, 山麓附近辐合上升运动维持, 有利于上游新对流单体不断触发并接续维持“列车效应”——老单体消亡、新单体接续, 造成降水持续。

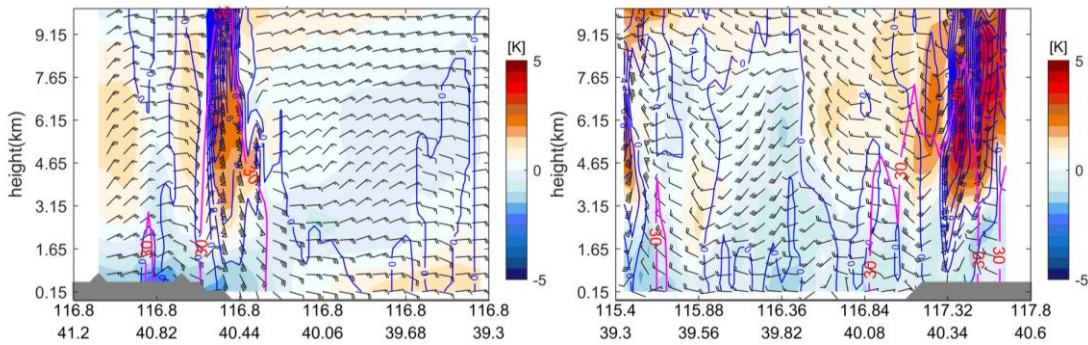


图 16 北京“25·7”极端暴雨第二和第三阶段 RMAPS-NOW 系统扰动温度 (填色, 单位: °C)、30dBz 雷达回波 (红色等值线)、垂直上升速度 (蓝色等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、风场 (风羽, 垂直速度扩大 10 倍) 的垂直剖面

(a) 26 日 20:30 沿图 14b 黑色虚线, (b) 28 日 02:30 沿图 15a 黑色虚线

Fig16 Vertical cross-sections of perturbed temperature (colored, unit: °C), echo reflectivity factor (30 dBz, red contour), vertical upward velocity (blue contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and wind field (u,v,w;w multiplied by 10, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in Stage 2 and Stage 3 of the July 2025 extreme torrential rain in Beijing from the RMAPS-NOW system

(a) at 20:30 BT 26 along the dashed line in Fig. 14b, (b) at 02:30 BT 28 along the dashed line in Fig. 15a

4 “25·7” 极端暴雨概念模型

由前面分析总结得到第二和第三阶段极端暴雨概念模型（图 17）。两个阶段极端暴雨成因存在异同。共同点一是均存在中尺度的低层或边界层急流脉动与地形的相互作用，急流出口区位于山麓和喇叭口地形附近，形成辐合抬升运动；二是边界层南风 and 东南风辐合叠加南风在迎风坡辐合抬升，有利于局地形成更深厚的强辐合上升运动；三是中上层对流潜热释放对降水的反馈作用。不同之处在于第二阶段是副高边缘暖区暴雨，由“列车效应”造成；而第三阶段有弱冷空气影响，与切变线和中尺度低涡南侧的动力辐合有关。

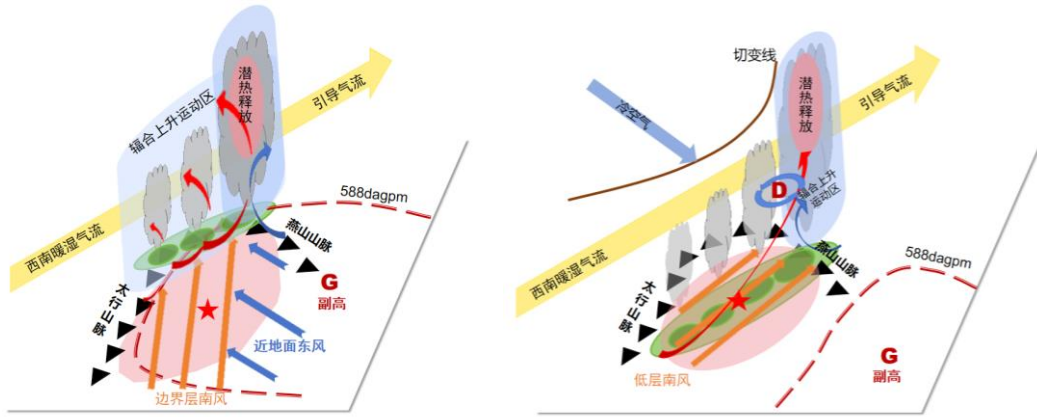


图 17 北京“25·7”极端暴雨 (a) 第二和 (b) 第三阶段概念模型

Fig17 Conceptual model for (a) Stage 2 and (b) Stage 3 of the July 2025 extreme rTorrential rain in Beijing

5 结论和讨论

本文利用多源资料、高分辨率格点分析资料等，对北京“25·7”极端暴雨过程的降雨实况、时空特征以及形成机制进行分析，结果表明：

- (1) 北京“25·7”极端暴雨出现在 7 月下旬稳定的大尺度环流背景下，副高较常年显著偏西、偏北、偏强，副高南侧台风活跃，有利于水汽向内陆输送。北京降水的阶段性演变分别对应副高外围、副高北抬、副高小幅南退和高空槽及冷空气影响。大气低层暖异常，925hPa 有水汽通量正距平、北京北部和东部为显著增强的水汽辐合区，具备高温、高湿和高 CAPE 的环境条件，假相当位温超过 348 K，大气可降水量高达 70 mm 以上。
- (2) 与北京近年来的极端暴雨过程相比，“25·7”过程在持续时间、最大降水量、全市平均的过程降水量、最大 3h/6h 降水量等方面均具有明显的极端性。其中第一和第四阶段暴雨范围虽广，但雨强总体不强，以一般性短时强降水为主；第二和第三阶段是极端暴雨阶段，暴雨集中在北部山区，具有“面弱点强”的特征，伴有极端短时强降水。
- (3) 第二阶段雷达回波具有明显的后向触发和“列车效应”特征；而第三阶段雷达回波特征为带状对流中不断有对流生消，持续时间长。暴雨均与地形相关，第二阶段出现在海拔

200~600 m, 而第三阶段主要位于海拔 300 m 以下。

(4) 中尺度低空急流出口区、边界层南风 and 东南风辐合以及山区喇叭口地形、迎风坡相配合, 造成局地深厚的辐合上升运动, 是第二和第三阶段出现极端暴雨有利的动力和地形条件。但两个阶段造成极端暴雨原因也有不同: 第二阶段是副高边缘暖区暴雨, 边界层中尺度南风急流出口区在北部浅山区形成沿山一线的辐合, 有利于后向对流的触发和停滞, 极端暴雨由“列车效应”造成; 而第三阶段有弱冷空气影响, 极端暴雨与切变线和中尺度低涡南侧的动力辐合有关。

本文从上述方面对北京“25·7”极端暴雨过程进行初步分析, 还有不少科学问题有待进一步的深入研究。包括并不限于: “25·7”极端暴雨为什么会出现在天气尺度低空急流明显减弱的时段? 第二和第三阶段中尺度低空急流脉动是如何形成并存在的? 其空间结构和作用是什么? 其次, 北京极端暴雨水汽来源和收支是怎样的? 云微物理过程怎样影响云内热动力结构, 从而影响对流和降水强度? 此外, 目前模式对极端暴雨的预报能力仍然有限(张博等, 2024), 根据本研究前期对于这次过程模式预报结果的初步评估来看, 全球模式仅能报出副高北部天气尺度切变线(冷暖交汇)造成的雨带, 对副高边缘复杂地形内的暖区暴雨则完全漏报; 区域模式相对有一定优势, 但对暖区暴雨范围和量级的预报仍显著偏小。那么模式预报偏差受哪些因素影响? 如何提高“七下八上”华北主汛期暖区暴雨的主客观精准预报能力, 还需要不断深入探究。

致谢: 北京市气象局数据中心提供实况降水、北京观象台雷达等观测资料, 北京城市气象研究院提供睿图-雷达组网雷达拼图、RISE 系统和 RMAPS-NOW 系统格点分析资料, 谨致谢忱!

参考文献

- 陈明轩, 高峰, 孙娟珍, 等, 2016. 基于 VDRAS 的快速更新雷达四维变分分析系统[J]. 应用气象学报, 27(3): 257-272. Chen M X, Gao F, Sun J Z, et al, 2016. An analysis system using rapid-updating 4-D variational radar data assimilation based on VDRAS[J]. J Appl Meteor Sci, 27(3): 257-272 (in Chinese).
- 陈明轩, 宋林焯, 杨璐, 等, 2025. “百米级、分钟级”短时临近预报技术的进展与展望——以睿思(RISE)发展路径为例[J]. 气象, 51(11): 1433-1454. Chen M X, Song L Y, Yang L, et al, 2025. Progress and prospect of the “100-meter-scale, minute-level-update” nowcasting technology—a case study of the RISE development path[J]. Meteor Mon, 51(11): 1433-1454 (in Chinese).
- 陈涛, 谌芸, 方翀, 等, 2024. “23·7”华北极端暴雨精细特征和天气学成因分析[J]. 气象学报, 82(5): 600-614. Chen T, Chen Y, Fang C, et al, 2024. Fine characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and associated synoptic weather patterns[J]. Acta Meteor Sin, 82(5): 600-614 (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]//中国科学院大气物理研究所集刊(第9号). 北京: 科学出版社: 119-134. 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 Science, Collected papers of Institute of Atmospheric Physics, No. 9. Beijing: Science Press: 119-134 (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).
- 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).
- 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).
- 柳龙生, 刘璐, 李英, 2025. 2023年7月一次华北极端暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学, 49(3): 645-663. Liu L S, Liu L, Li Y, 2025. Multiscale characteristics of an extreme rainstorm in North China in July 2023[J]. Chin J Atmos Sci, 49(3): 645-663 (in Chinese).
- 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等, 2021. 2021年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 45(6): 1366-1383. Ran L K, Li S W, Zhou Y S, et al, 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7.20” extreme rainstorm event in Henan Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1366-1383 (in Chinese).
- 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等, 2021. 郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 40(5): 445-454. Su A F, Lü X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7.20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Torr Rain Dis, 40(5): 445-454 (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, 何娜, 王国荣, 等, 2012. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 31(3): 218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al, 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torr Rain Dis, 31(3): 218-225 (in Chinese).
- 孙继松, 何娜, 郭锐, 等, 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学, 37(1): 137-148. Sun J S, He N, Guo R, et al, 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms[J]. Chin J Atmos Sci, 37(1): 137-148 (in Chinese).
- 孙继松, 2025. 不同尺度天气系统在华北暴雨过程中相互作用的再认识[J]. 气象, 51(11): 1405-1416. Sun J S, 2025. Re-understanding the interaction of multi-scale synoptic systems during torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 51(11): 1405-1416 (in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225-228. Tao S Y, 1980. Heavy Rainfalls in China[M]. Beijing: Science Press: 225-228 (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).
- 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).
- 俞小鼎, 2013. 短时强降雨临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3): 202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3): 202-209 (in Chinese).
- 张博, 张芳华, 李晓兰, 等, 2024. “23·7”华北特大暴雨数值预报检验评估[J]. 应用气象学报, 35(1): 17-32. Zhang B, Zhang F H, Li X L, et al, 2024. Verification and assessment of “23·7” severe rainstorm numerical prediction in North China[J]. J Appl Meteor Sci, 35(1): 17-32 (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).

- 张晓芳, 陆汉城, 2006. 梅雨锋暴雨过程潜热及反馈机理个例分析[J]. 气象科技, 34(5): 567-573. Zhang X F, Lu H C, 2006. Analysis of latent heat and its feedback mechanism during a Meiyu-Front rainstorm[J]. Meteor Sci Technol, 34(5): 567-573 (in Chinese).
- 赵嘉诚, 李清泉, 丁一汇, 等, 2023. 21 世纪第 2 个 10 年初华北夏季降水年代际增加及与大气环流异常的联系[J]. 气象学报, 81(5): 764-775. Zhao J C, Li Q Q, Ding Y H, et al, 2023. Interdecadal increase of summer precipitation in North China in the early 2010s and its association with atmospheric circulation anomalies[J]. Acta Meteor Sin, 81(5): 764-775 (in Chinese).
- 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛, 2008. 华南锋面与暖区暴雨两个例对比分析[J]. 气象科技, 36(1): 47-54. Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N, 2008. Comparison analysis of South China front and warm-area heavy rain systems in June 2006[J]. Meteor Sci Technol, 36(1): 47-54 (in Chinese).
- 朱连华, 李清泉, 王冀, 等, 2023. 全球增暖 1.5/2℃ 下中国区域极端降水的风险变化及其影响因子[J]. 大气科学学报, 46(1): 97-109. Zhu L H, Li Q Q, Wang J, et al, 2023. Risk and impact analysis of extreme precipitation over China under 1.5 and 2℃ global warming levels[J]. Trans Atmos Sci, 46(1): 97-109 (in Chinese).
- 朱乾根, 1979. 暴雨维持和传播的机制分析[J]. 南京气象学院学报, 2(1): 1-7. Zhu Q G, 1979. Mechanism analysis of the maintenance and propagation of heavy rainstorms[J]. J Nanjing Institute Meteor, 2(1): 1-7 (in Chinese).
- 谌芸, 孙军, 徐珺, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 38(10): 1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 Torrential Rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1255-1266 (in Chinese).
- Du Y, Chen G X, 2018. Heavy rainfall associated with double Low-Level Jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis[J]. Mon Wea Rev, 146(11): 3827-3844.
- Du Y, Chen G X, 2019. Climatology of low-level jets and their impact on rainfall over Southern China during the early-summer rainy season[J]. J Climate, 32(24): 8813-8833.
- Gu J, Zhao C, Xu M Y, et al, 2025. Fast warming over the Mongolian plateau a catalyst for extreme rainfall over North China[J]. Geophys Res Lett, 52(8): e2024GL113737.
- Guo C W, Xiao H, Yang H L, et al, 2014. Simulation of the microphysical processes and effect of latent heat on a heavy rainfall event in Beijing[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 7(6): 521-526.
- Luo Y H, Du Y, 2023. The roles of low-level jets in "21·7" Henan extremely persistent heavy rainfall event[J]. Adv Atmos Sci, 40(3): 350-373.
- Luo Y H, Du Y, 2025. Moisture sources and sinks of low-level jets in South China: a backward and forward trace model approach[J]. J Climate, 38(11): 2641-2658.
- Lv N, Lin Z X, Nie J, et al, 2025. Environmental features of heavy precipitation under favorable synoptic patterns: a lesson from the 2021 Henan extreme precipitation event[J]. Adv Atmos Sci, 42(9): 1863-1875.
- Xu M Y, Zhao C, Li G D Z, et al, 2024. Modeling across scales of heavy precipitation with a global variable-resolution model: a case study of a catastrophic event in China[J]. J Geophys Res: Atmos, 129(19): e2024JD041180.
- Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al, 2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021[J]. J Meteor Res, 36(1): 6-25.