

吴珍珍,林浩,薛峰,等,2026.2025 年北京超长极端暴雨的精细化特征与成因分析[J].气象,52(6):686-701. Wu Z Z, Lin H, Xue F, et al, 2026. Refined characteristics and causes of the ultra-long-duration extreme torrential rain in Beijing in 2025[J]. Meteor Mon, 52(6):686-701(in Chinese).

2025 年北京超长极端暴雨的精细化特征与成因分析*

吴珍珍^{1,2,3} 林浩^{1,2,3} 薛峰⁴ 向钢⁵ 黄小玉⁴

毛紫怡⁶ 欧小锋^{1,2,3} 闫如柳^{1,2,3}

- 1 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118
- 2 中国气象局高影响天气重点开放实验室,长沙 410118
- 3 湖南省气象科学研究所,长沙 410118
- 4 国家气象中心,北京 100081
- 5 湖南省株洲市气象局,株洲 412003
- 6 湖南省气候中心,长沙 410118

提 要: 利用逐小时自动气象站、雷达等多源观测数据及 ERA5 再分析数据,对 2025 年 7 月 23—29 日北京超长区域性暴雨过程开展精细化特征及成因分析。结果表明:本次极端暴雨过程为近 10 年持续时间最长的暴雨过程,日降水量 ≥ 50 mm 的站点数及过程日最大降水量仅次于 2023 年 7 月 30 日暴雨过程。本次过程具有显著的夜雨特征,小时雨强最大值集中在午夜至凌晨时段,强降水区域主要分布于燕山山脉前的平原处和迎风坡地带。本次过程主要受副热带高压(以下简称副高)和低纬热带天气系统、中高纬西风槽影响。7 月 23—28 日位势高度距平场分析表明,副高较常年偏北,热带低压系统与异常偏北的副高外围气流叠加,形成持续偏南风气流并向北输送至北京地区,为极端降水提供了充沛水汽;水汽含量显著高于气候平均态,比湿高值区与偏南风距平叠加,加之燕山山脉地形抬升作用,显著增强了降水强度。本次过程在 500 hPa 以下高度均维持长时间的高湿环境,925、850、700 hPa 平均比湿均超过近 10 年来暴雨过程的平均水平(依次为 14.3、12.2、7.4 $g \cdot kg^{-1}$,北京探空站统计)。在白天高温高湿条件下,储存不稳定能量,夜间增强的低空急流叠加地形抬升作用,使暴雨过程呈现出明显的夜雨特征。虽然利用 ERA5 再分析等常规资料无法分析出 26 日晚极值暴雨的主要影响系统,但从雷达图上可清楚地分析出,主要的影响系统是低层辐合线与小范围的低空急流。

关键词: 超长极端暴雨,精细化特征,成因

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.042701

Refined Characteristics and Causes of the Ultra-Long-Duration Extreme Torrential Rain in Beijing in 2025

WU Zhenzhen^{1,2,3} LIN Hao^{1,2,3} XUE Feng⁴ XIANG Gang⁵ HUANG Xiaoyu⁴
MAO Ziyi⁶ OU Xiaofeng^{1,2,3} YAN Ruliu^{1,2,3}

- 1 Hunan Key laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118
- 2 Key Laboratory of High Impact Weather, CMA, Changsha 410118
- 3 Hunan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118
- 4 National Meteorological Centre, Beijing 100081
- 5 Zhuzhou Meteorological Office of Hunan Province, Zhuzhou 412003
- 6 Hunan Climate Centre, Changsha 410118

* 中国气象局高影响天气(专项)重点开放实验室项目(2024-G-10)、2024 年湖南省重大研发专项(2024AQ2016)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2025J136)共同资助

2025 年 11 月 7 日收稿; 2026 年 4 月 15 日收修定稿

第一作者:吴珍珍,主要从事中小尺度天气动力学、气象防灾减灾研究. E-mail:75502361@qq.com

通讯作者:林浩,主要从事暴雨预报技术研究. E-mail:147914958@qq.com

Abstract: Using refined hourly meteorological observations, radar data, and other multi-source observation data, along with ERA5 reanalysis data, this paper analyzes the characteristics and causes of the ultra-long-duration regional extreme torrential rain event that occurred in Beijing from 23 to 29 July 2025. The results indicate that this event was the longest-lasting heavy precipitation event in the past decade, and the number of stations with daily precipitation ≥ 50 mm and the daily maximum precipitation during the event ranked the second after the extreme torrential rain event on 30 July 2023. This event also exhibited significant nocturnal rainfall characteristics, with the maximum hourly rainfall intensity concentrated in the period from midnight to early morning hours. The areas of heavy precipitation were primarily distributed over the plains in front of the Yanshan Mountains and on the windward slopes. This torrential rain event was mainly influenced by the subtropical high system, low-latitude tropical weather systems, and mid-to-high-latitude westerly troughs. The analysis of the geopotential height anomaly field from July 23 to 28 reveals that the subtropical high was positioned more northward than usual. The tropical low-pressure system overlapped with the abnormally northward-shifted peripheral airflow of the subtropical high, forming a sustained southerly airflow that was transported northward to the Beijing Region, which provided abundant moisture for the extreme precipitation. The moisture content was significantly higher than the climatological average, with areas of high specific humidity overlapping with southerly wind anomalies. Coupled with the orographic uplift effect of the Yanshan Mountains, these factors significantly enhanced precipitation intensity. A prolonged high-humidity environment was maintained below 500 hPa throughout this event, with the average specific humidity at 925 hPa ($14.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 850 hPa ($12.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and 700 hPa ($7.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) exceeding the average values recorded in torrential rain events over the past decade (based on statistics from the Beijing Sounding Station). Under the daytime conditions of high temperature and humidity, unstable energy was accumulated. At night, the enhanced low-level jet, combined with terrain lifting, contributed to the pronounced nocturnal rainfall characteristics of this torrential rain event. The major impact systems of the extreme torrential rain over the night of 26 July could not be identified with the conventional data including ERA5 reanalysis data, but the radar imagery clearly reveals that the main impact systems of the extreme torrential rain were the low-level convergence line and the small-scale low-level jet.

Key words: ultra-long-duration extreme torrential rain, refined characteristic, cause

引言

近年来,极端降水事件呈现频发、强度增强的趋势,暴雨作为其中最具破坏力的灾害之一,已成为威胁人类社会安全的重大挑战,尤其是短时强降水与持续性暴雨叠加,会引发城市内涝、山体滑坡及河流泛滥等次生灾害,造成巨额经济损失与人员伤亡。例如:2021年郑州特大暴雨导致城市瘫痪(郭丹妮等,2023;姚秀萍和李若莹,2023;汤彬等,2023;叶成志等,2025),2023年京津冀地区极端强降水引发多地洪涝(柳龙生等,2025;李晓兰等,2025;刘艳婕等,2025),2025年北京暴雨造成严重的人员伤亡和经济损失,均凸显了北方暴雨灾害的复杂性及其应对的紧迫性。

相较于南方,北方暴雨具有鲜明的时空变化特征,北方暴雨主要发生在6—8月,其发生频次较低,但降水效率高、突发性强,常伴随短时强降水与雷暴大风等强对流天气,导致预报难度增大、灾害防御窗口期缩短(陶诗言,1980;林建和杨贵名,2014;雷蕾等,2020;张芳华等,2024;万子为等,2024;吴卓亨等,2024;孙继松,2025)。一方面,北方暴雨多发生在中高纬阻塞高压稳定维持与副热带高压异常北跳的环流背景下。高空槽等天气尺度强迫与低层偏南风急流配合,强的暖湿气流输送提供充沛的水汽和能量,从而触发对流不稳定,且当台风等低涡系统与西风槽相遇时,两者之间的相互作用会进一步加剧极端暴雨过程(柳艳菊等,2015;张夕迪等,2023;陈涛等,2024;徐姝等,2024;刘威等,2025)。另一方面,中小尺度系统的触发与局地增强作用。低空急

流携带南海与孟加拉湾暖湿气流,在太行山与燕山复杂地形强迫抬升作用下,触发局地强降水(孙建华等,2006;徐珺等,2014;张江涛等,2023;李国翠等,2023;马长健等,2023;田利庆等,2024)。此外,中层干冷空气与低层暖湿急流的辐合可形成聚能机制,加剧低层的潜在不稳定。中层偏西干冷气流与低层西南暖湿急流相互作用,通过动力锋生和上升运动触发强降水(符娇兰等,2023;杨晓亮等,2023)。这些多尺度系统的非线性相互作用,使得北方暴雨的预报仍存在较大不确定性,因此深入开展北方暴雨的研究尤为必要。

2025年7月23—29日,北京遭遇了一次历史罕见的超长极端暴雨过程,累计降水量突破600mm,覆盖京津冀大部分地区(陈双等,2026),引发永定河等流域超警戒洪水(包红军等,2026),造成89.4万人受灾,直接经济损失约26.5亿元。与典型北方暴雨相比,本次过程呈现出“持续时间长、影响范围广、降水效率高”的异常特征。

1 数据与方法

1.1 数据

本文资料主要包括:(1)地面国家气象站与区域自动气象站逐小时观测资料,用于分析本次超长极端暴雨的降水精细化特征并统计2016年以来连续性暴雨过程;(2)欧洲中期数值预报中心的ERA5再分析资料(时间分辨率1h、空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),用于深入分析大气环流及其异常特征与暴雨的成因;(3)雷达天衍拼图资料、北京单站雷达资料,主要用于分析本次暴雨过程成因;(4)2016—2025年北京探空资料,用于计算并统计北京暴雨过程各层比湿特征。

1.2 环流距平场计算

根据式(1)对本次过程的位势高度、比湿和风场进行距平场计算。

$$A'_i(x, y) = A_i(x, y) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_i(x, y) \quad (1)$$

式中: N 为年数, (x, y) 为网格点, $A_i(x, y)$ 和 $A'_i(x, y)$ 分别为网格点上某个时刻的位势高度、比湿和风场观测值及其20年(2005—2024年)距平值。

1.3 比湿计算

利用探空资料各层的大气温度和露点温度,根据式(2)计算出各气压层上的实际水汽压,然后利用式(3)计算各气压层上的比湿。

$$e = 6.1078 \exp \frac{aT_d}{273.16 + T_d} \quad (2)$$

式中: e 为水汽压(单位:hPa)、 T_d 为某高度上空气的露点温度(单位: $^\circ\text{C}$); a 、 b 为常数,水面上分别取17.269、35.86,冰面上分别取21.874、7.60。

$$q = \frac{622e}{p - 0.378e} \quad (3)$$

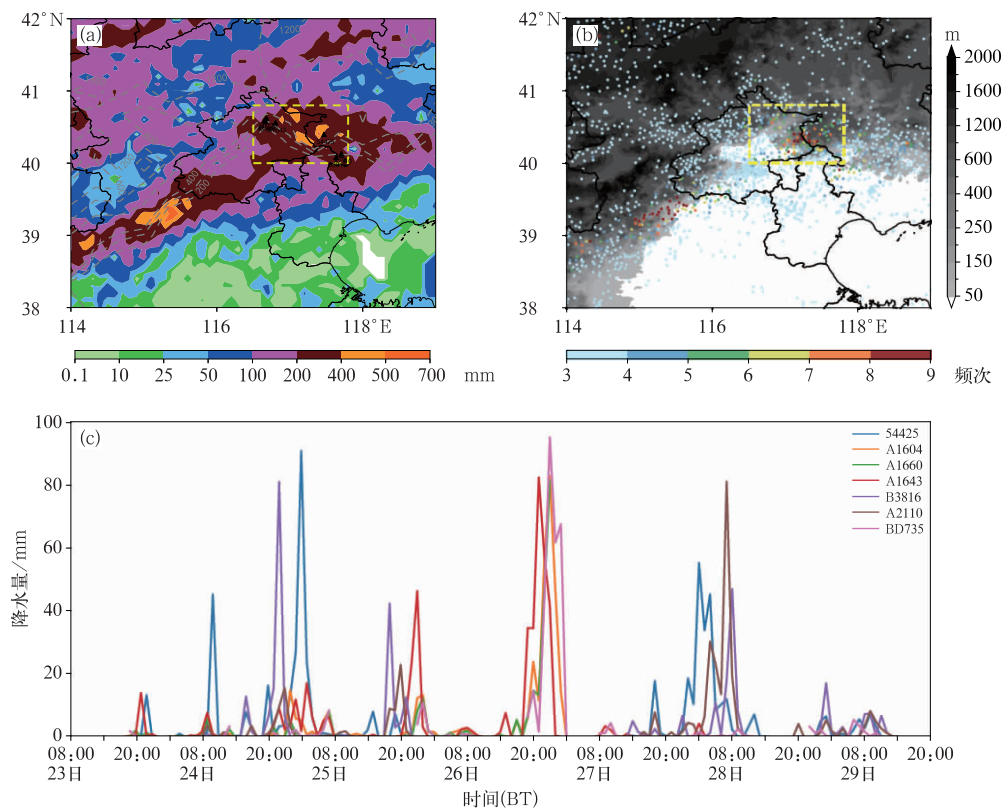
式中: q 为比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), p 为某高度上的气压(单位:hPa)。

2 超长极端暴雨精细化特征

图1a为2025年7月23日08:00至29日20:00(北京时,下同)累计降水量的分布。由图可见:本次过程持续影响共7d,其中,2个站的过程累计降水量达到600mm以上,北京区域内最大过程累计降水量达605.8mm(位于北京大兴区),6个站达到500mm以上。北京地区的降水大值区主要集中在东部及东北部区域,造成了重大的经济损失和人员伤亡。 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水中心主要位于北京东部及东北部的燕山迎风坡及山前平原区域,以6~9个频次为主(图1b)。一般以20:00至次日08:00降水量作为夜间降水量(余忠水,2011),从单站降水量最多的前7个站点可见(图1c),本次暴雨过程持续时间较长,小时雨强最大值的时间段主要在午夜和凌晨,具有明显的夜雨特征,其中,最大小时雨强出现在7月26日23:00,达 $95.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

为了进一步分析本次超长极端暴雨过程的精细化特征,本文统计了2025年7月23日08:00至29日20:00图1a黄色虚框内所有站点 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水频次在不同时间段和不同海拔高度的分布(图2)。由图2a可见,本次过程具有显著的夜雨特征,强降水主要出现在20:00至次日08:00,最高频次在23:00,出现了111次,其次是21:00和04:00,分别出现了91次和77次。而这些强降水主要位于海拔0~50m的燕山山脉前的平原处,其次是位于600~800m的燕山山脉迎风坡地区(图2b)。

本文将北京范围内3个及以上的区域或国家气象站24h(08:00至次日08:00)累计降水量



注:图 a, b 中黄色虚线框表示本文关注的降水区域。

图 1 2025 年 7 月 23 日 08:00 至 29 日 20:00 (a) 累计降水量(填色)和海拔高度(灰线,单位: m), (b) $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水频次(彩色圆点)和海拔高度(阴影)分布及 (c) 累计降水量前 7 的站点逐小时降水量时序图

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation (colored) and altitude (grey line, unit: m), (b) precipitation frequencies (colored dot) with intensity $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and altitude (shaded), and (c) time-series of hourly precipitation at the top seven stations in terms of accumulated precipitation from 08:00 BT 23 to 20:00 BT 29 July 2025

$\geq 50 \text{ mm}$ 定义为一个暴雨日,暴雨时间连续 2 d 则定义为连续性暴雨过程,以此定义并统计了 2016—2025 年共 10 年的北京地区持续性暴雨过程(图 3, 表 1)。通过统计表明(图略),近 10 年北京地区持续 2 d 的暴雨过程出现最多(24 次),持续 3 d 暴雨过程出现 8 次,持续 4 d 和 5 d 均出现 3 次,而持续 6 d 仅有 1 次(为本次暴雨过程)。图 3 结合表 1 可见,近 10 年日降水量 $\geq 50 \text{ mm}$ 站数最多的是 2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日台风暴雨过程(1050 个站),次多的是本次暴雨过程(909 个站),第三是 2021 年 7 月 12—14 日(583 个站);日降水量 $\geq 100 \text{ mm}$ 的站数最多的是 2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日(448 个站),次多的是 2016 年 7 月 20—21 日(326 个站),第三是本次暴雨过程(214 个站);日降水量 $\geq 250 \text{ mm}$ 的暴雨过程只有 3 次,分别为 2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日(69 个站)、2016 年 7 月 20—21 日(36 个站)和本次暴雨过程(6 个站),过程

日最大降水量分别为 421.9、372.7、300.0 mm。以上分析说明,本文分析的极端暴雨过程在近 10 年以来持续时间最长(6 d),日降水量 $\geq 50 \text{ mm}$ 的站数和过程日最大降水量仅次于 2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日台风暴雨过程。

3 大气环流及其距平场特征

7 月 23—29 日,500 hPa 亚欧中高纬地区由“一槽一脊”逐渐转变为“两脊一槽”的环流形势,北京地区主要受副热带高压(以下简称副高)和低纬热带天气系统、中高纬西风槽影响。23 日 20:00(图 4a),中亚至贝加尔湖地区为宽广的高空槽控制,高压脊线从西伯利亚延伸至东北地区。西太平洋副高呈块状分布,控制江南及华北部分地区,副高中心位于日本上空。第 7 号台风“范斯高”以热带风暴级强度沿副高南侧的东风气流一路西行,第 8 号台风“竹节草”

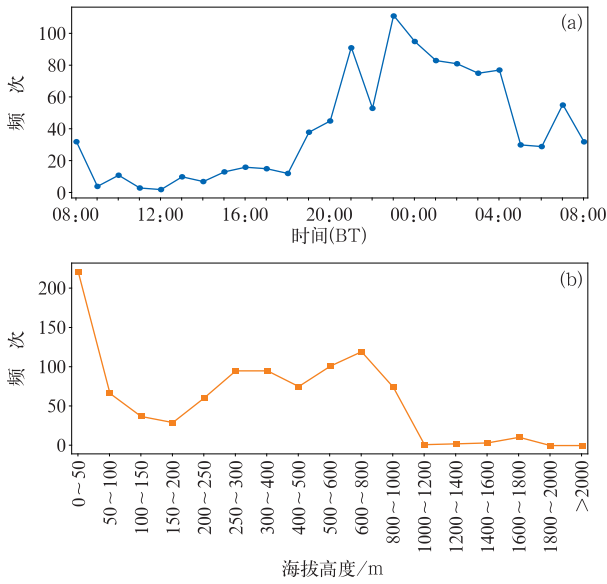


图 2 2025 年 7 月 23 日 08:00 至 29 日 20:00 图 1a 黄色虚线框内 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水频次在 (a) 不同时间段和 (b) 不同海拔高度的平均分布

Fig. 2 Distribution of precipitation frequencies with intensity $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ within the yellow dashed box in Fig. 1a in

(a) different time periods and (b) different altitudes from 08:00 BT 23 to 20:00 BT 29 July 2025

在南海东北部生成,第 6 号台风“韦帕”的残余环流位于中南半岛。台风与副高之间形成一支跨越约

50 个纬距的强盛低空急流,急流中心的风速超过 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,将南海和东海的暖湿气流源源不断地输送到我国东部沿海和华北地区,北京受副高边缘的短波槽控制,降水较弱。24 日 20:00(图 4b),高压脊减弱并移动至东西伯利亚地区,副高稳定少动,“范斯高”强度减弱并移动至浙江南部到福建北部一带沿海,“竹节草”稳定少动,但强度加强,第 9 号台风“罗莎”在塞班岛西北侧洋面生成。850 hPa 低空急流加强、北抬,北京处于低空急流控制之下。26 日 20:00(图 4c),亚欧中高纬地区环流经向度加大,高空槽在东移过程中分裂出短波槽,开始影响北京地区,副高加强西伸,脊线西伸至 90°E ,“范斯高”强度减弱,“罗莎”加强为强热带风暴级,“竹节草”强度明显减弱,北京地区 850 hPa 低空急流强度有所减弱。28 日 20:00(图 4d),中高纬环流经向度进一步加大,冷涡发展东移,副高断裂为大陆高压和海上高压,“竹节草”减弱后又在我国东南沿海再次加强,“罗莎”加强北移。850 hPa 低空急流断裂,到达北京地区的暖湿气流明显减弱,降水减弱。

以上分析表明,23—25 日中高纬度环流平直,冷空气较弱,受台风影响,副高稳定维持,北京长时间位于副高边缘高温、高湿、高不稳定能量区域中。整体上,20:00 北京中低层风速明显大于 08:00,降水在晚上发展加强,白天减弱结束,但白天太阳加热

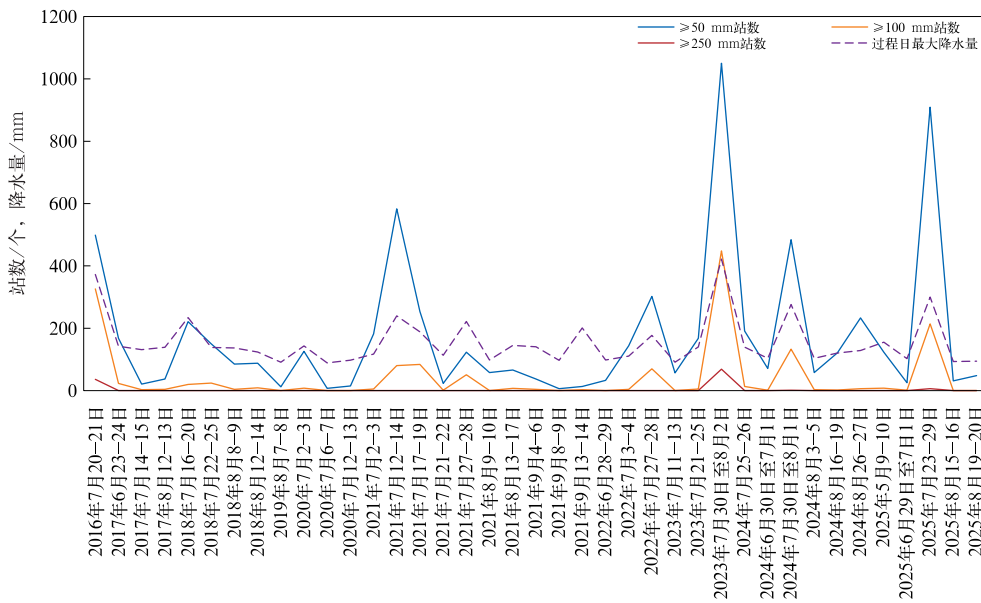


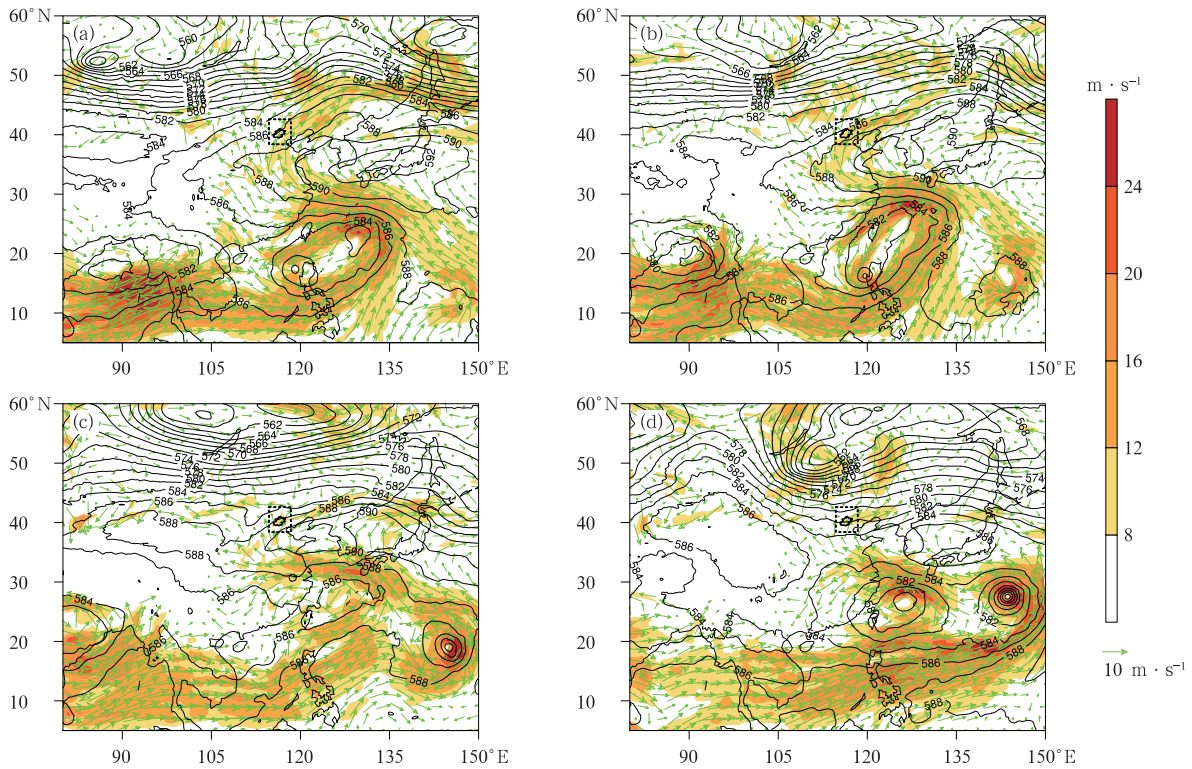
图 3 2016—2025 年北京地区持续暴雨过程的不同日降水量阈值站数及日最大降水量

Fig. 3 Number of stations with daily precipitation exceeding various thresholds during persistent torrential rain events and the maximum daily precipitation during these events in Beijing Region from 2016 to 2025

表 1 2016—2025 年北京地区持续 3 d 以上的暴雨过程统计

Table 1 Statistics of torrential rain events lasting more than 3 d in Beijing Region from 2016 to 2025

持续性暴雨过程	持续 天数/d	日最大降水 量/mm	过程最大累计 降水量/mm	≥50 mm 站数/个	≥100 mm 站数/个	≥250 mm 站数/个
2018 年 7 月 16—20 日	5	234.4	244.1	221	20	0
2018 年 7 月 22—25 日	4	138.3	182.7	150	24	0
2018 年 8 月 12—14 日	3	123.5	123.2	88	9	0
2021 年 7 月 12—14 日	3	239.6	242.2	583	80	0
2021 年 7 月 17—19 日	3	188.3	238.5	254	84	0
2021 年 8 月 13—17 日	5	145.1	290.0	66	7	0
2021 年 9 月 4—6 日	3	140.4	104.8	37	4	0
2023 年 7 月 11—13 日	3	91.1	104.2	57	0	0
2023 年 7 月 21—25 日	5	140.1	151.4	168	5	0
2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日	4	421.9	690.3	1050	448	69
2024 年 7 月 30 日至 8 月 1 日	3	276.2	301.9	484	133	1
2024 年 8 月 3—5 日	3	103.8	104.6	58	3	0
2024 年 8 月 16—19 日	4	120.3	151.1	121	2	0
2025 年 6 月 29 日至 7 月 1 日	3	102.6	114.8	25	1	0
2025 年 7 月 23—29 日	6	300.0	534.2	909	214	6



注:图中黑色虚线框为北京及周边地区位置,下同。

图 4 2025 年 7 月(a)23 日 20:00,(b)24 日 20:00,(c)27 日 20:00 和(d)28 日 20:00
500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风矢)与风速(填色)
Fig. 4 Geopotential height at 500 hPa (contour, unit: dagpm), wind field (vector)
and wind speed (colored) at 850 hPa at (a) 20:00 BT 23, (b) 20:00 BT 24,
(c) 20:00 BT 27 and (d) 20:00 BT 28 July 2025

积聚大量不稳定能量,又有利于晚上的对流性强降水发生,如此反复,形成了连续几天的夜雨。随后

28 日冷空气加强,强降水逐渐移出北京。由于 26 日夜间的短时强降水范围较小,局地性较强,基于再

分析数据不能完全反映出 26 日的暴雨过程特征,因此本文将在后续章节用更精细的观测数据分析 26 日的暴雨过程。

大气环流异常是造成降水异常的直接原因(金炜昕等,2014)。图 5 为 2025 年 7 月 23—28 日相对于 2005—2024 年共 20 年的 500 hPa 位势高度、850 hPa 比湿和风场的距平场,计算方法如式(1)所示。由图可见,7 月 23—24 日,在我国东北地区存在位势高度距平正异常中心,受台风影响,在菲律宾和南海的东北部区域均存在明显的负高度异常中心,说明副高较常年偏北,热带低压系统与异常偏北的副高外围气流叠加,形成持续的偏南风气流向北输送至北方地区,为极端降水提供充沛水汽。我国北方地区的 850 hPa 比湿正距平中心也表明本次暴雨过程的水汽含量显著高于气候平均态,比湿距平可达 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,比湿高值区与偏南风距平叠加,加之燕山山区地形抬升作用,可显著增强降水强度。26 日 20:00,位势高度距平正异常中心向南移动,南海东北部地区的位势高度距平负异常中心消

散,而菲律宾东北部的负异常中心向北移动,在其东南侧形成新的负异常中心,北京地区的偏南风距平和 850 hPa 比湿正距平中心有所减弱。28 日,位势高度距平正异常中心和比湿正距平中心虽有所减弱,但是北方出现偏北风距平,说明此时暴雨地区受到冷空气影响,使强降水持续,到了 29 日降水才减弱消散。

在本次北京暴雨过程中,大气环流场呈现出显著的异常特征。具体而言,7 月 23—28 日位势高度距平分析表明,东海、南海为负异常中心,渤海、华北及东北地区为正异常中心,说明副高较常年偏北,异常强劲的偏南风持续且稳定地向北京暴雨区域输送暖湿空气,使得显著高于气候平均态的正异常比湿中心在暴雨区域内长时间维持,加之燕山山脉地形抬升作用,暴雨得以持续发生。然而,26 日 20:00 北京地区的比湿距平和偏南风距平却是减弱的,说明由于数据精度等原因,再分析数据不能完全反映出 26 日局地性暴雨的热动力特征。

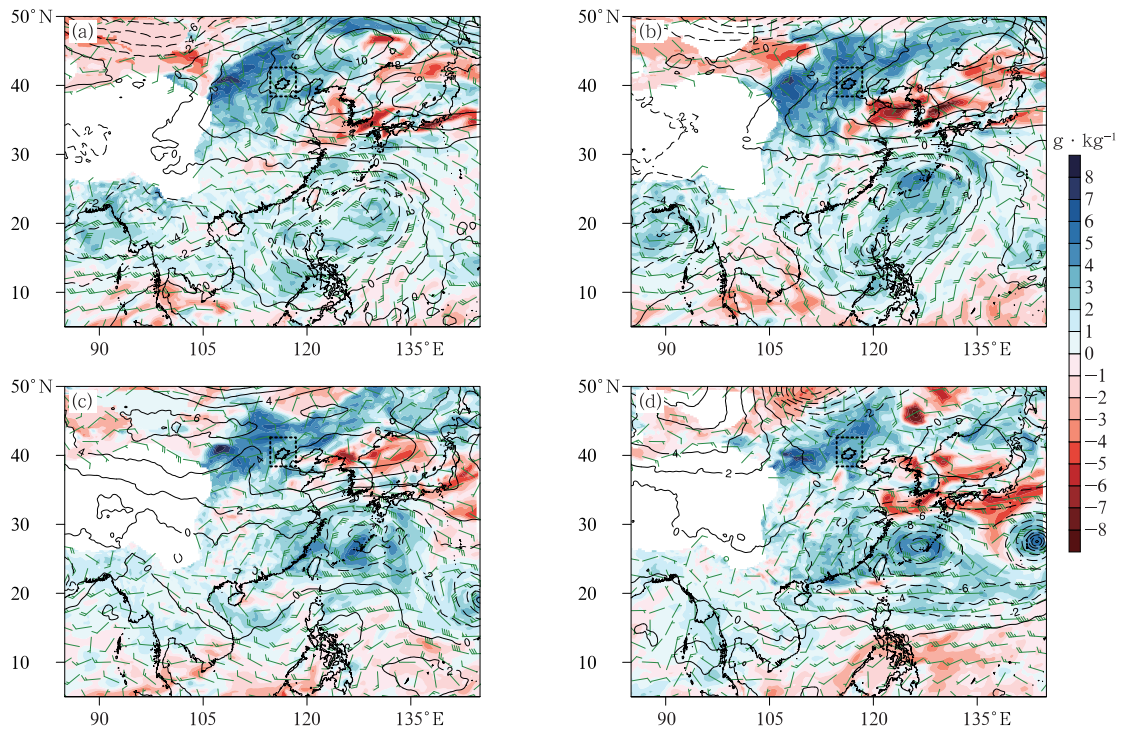


图 5 2025 年 7 月 (a)23 日 20:00, (b)24 日 20:00, (c)26 日 20:00 和 (d)28 日 20:00 500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)、850 hPa 比湿(填色)和风场(风羽)的距平(相对于 2005—2024 年)

Fig. 5 Anomalies of geopotential height at 500 hPa (contour, unit: dagpm), specific humidity (colored) and wind field (barb) at 850 hPa relative to the climatological average from 2005 to 2024 at (a) 20:00 BT 23, (b) 20:00 BT 24, (c) 20:00 BT 26 and (d) 20:00 BT 28 July 2025

4 超长持续暴雨成因分析

4.1 水汽条件

持续的水汽输送给北方暴雨区带来充分的水汽和不稳定能量(张元春等,2023;张芳华等,2023)。本文计算了本次过程的1000~300 hPa整层水汽通量与水汽通量散度(图6)。由图可见,位于中南半岛的第6号台风“韦帕”的残余环流和第7号台风“范斯高”、第8号台风“竹节草”以及刚生成的第9号台风“罗莎”汇聚形成的强大西南风气流沿副高外围将海面上的暖湿气流输送到暴雨区域,并在该区域形成强的水汽辐合中心,给暴雨区提供强大的水汽与不稳定能量(图6a)。7月25—26日,“范斯高”和“韦帕”的残余环流以及“竹节草”强度明显减弱,而“罗莎”继续增强,导致西南气流水汽输送减弱(图6c)。尤其是26日20:00左右,水汽输送强度明显减弱。7月27日20:00之后,水汽虽然有所减弱,但是由于北方弱冷空气入侵暴雨区域,降水增

加,29日之后,暴雨才逐渐结束。

由此可见,强大的暖湿水汽输送是本次超长极端暴雨持续时间长的原因之一。相比于本次整个暴雨过程,26日夜间暴雨强度更强,但是基于再分析数据的水汽条件却更差,再次说明基于再分析数据不能完全反映出26日局地性暴雨的物理特征。

4.2 热力和动力条件

为了进一步讨论本次暴雨的成因,对动力与热力特征开展了分析。由图7可见,7月24日20:00,850 hPa上一条比湿超过 $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的湿舌自西南向东北方向延伸。强劲的西南低空急流在北京暴雨区域辐合,在燕山山前平原及迎风坡地区形成了明显的垂直上升运动区域。该区域比湿高值区与垂直速度负值区相互重叠,且暴雨区域温度维持在 20°C 以上,呈现出显著的高温高湿特征,这种有利的天气条件为暴雨的发生发展提供了良好的环境。至25日20:00,这条湿舌持续向更北方向延伸,低空急流强度显著增强,暴雨得以持续发展。26日20:00,暴雨区域的比湿有所降低,低空急流强度有所减弱,垂

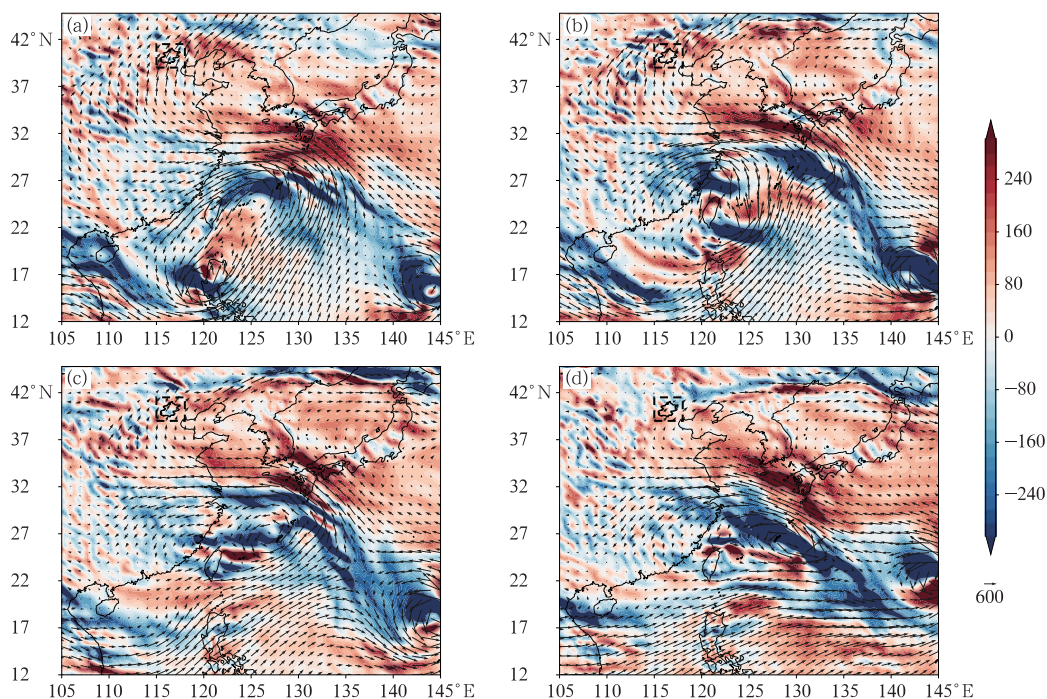
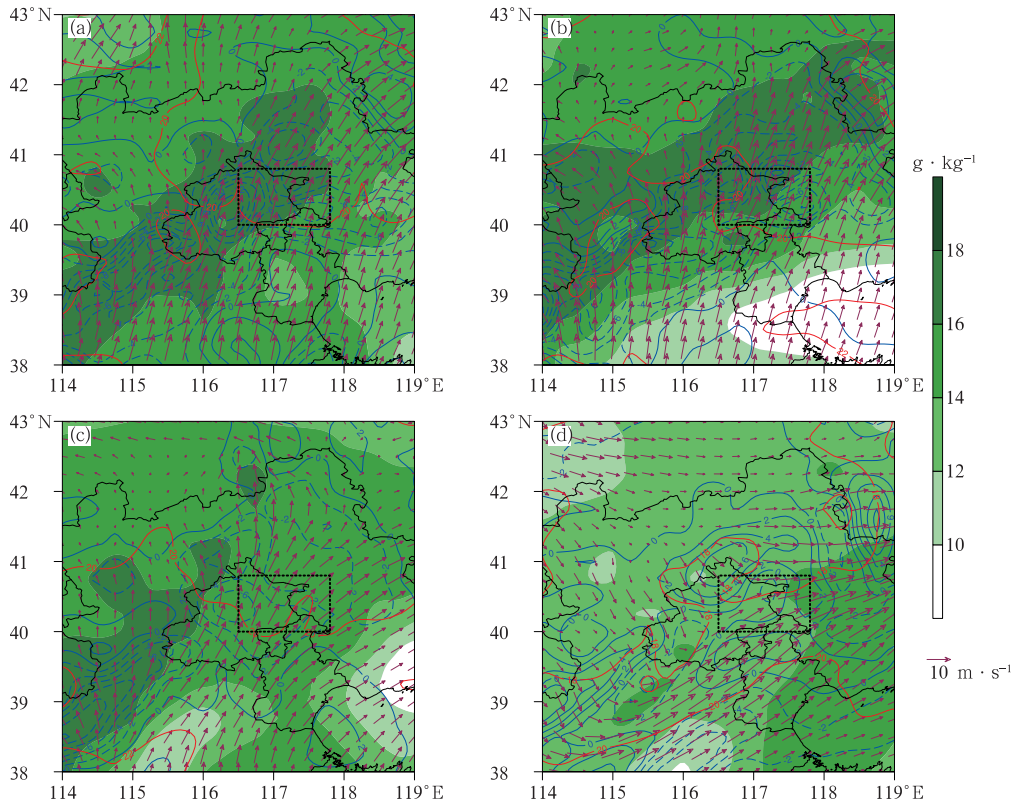


图6 2025年7月(a)24日20:00,(b)25日20:00,(c)26日20:00和(d)27日20:00 1000~300 hPa整层水汽通量(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)与水汽通量散度(填色,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 The vertically integrated water vapor flux (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in 1000—300 hPa

at (a) 20:00 BT 24, (b) 20:00 BT 25, (c) 20:00 BT 26 and (d) 20:00 BT 27 July 2025



注:虚线框表示本文关注的降水区域。

图 7 2025 年 7 月 (a) 24 日 20:00, (b) 25 日 20:00, (c) 26 日 20:00, (d) 29 日 08:00 850 hPa 垂直速度 (蓝线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)、比湿 (填色)、风场 (风矢) 和地面温度 (红线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 7 Vertical velocity (blue line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), specific humidity (colored) and wind field (vector) at 850 hPa and surface temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$) at (a) 20:00 BT 24, (b) 20:00 BT 25, (c) 20:00 BT 26 and (d) 08:00 BT 29 July 2025

直上升运动也随之相应减弱,暴雨区向北偏移。27 日 20:00 之后,冷空气开始入侵北京地区,特别是 29 日之后,冷空气进一步加强,比湿降至 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,北京地区转为下沉气流控制,暴雨逐渐减弱并最终消散。

结合图 8 物理量的垂直演变和降水量的时序图可以看出,7 月 23 日 08:00 至 27 日 20:00,暴雨区域主要受西南风控制,降水表现出明显的夜雨特征。暴雨发生时,700 hPa 以下高度层表现出高温高湿的环境特征。夜间,西南低空急流显著加强,配合高温高湿环境,以及显著增强的垂直上升运动,是导致夜雨出现的主要原因。27 日 20:00 之后,冷空气入侵暴雨区域,降水强度增强。至 29 日,冷空气进一步增强,暴雨区域 500 hPa 以下高度层均被东北风控制,暴雨随之减弱并消散。

为进一步量化本次过程的高湿特征,本文基于北京探空数据,将近 10 年暴雨过程与本次过程主要暴雨区域不同层次(925~500 hPa)的逐小时最大比

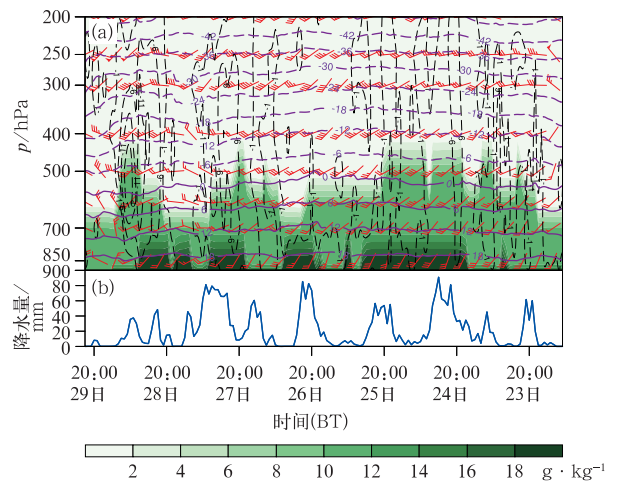


图 8 2025 年 7 月 23 日 08:00 至 29 日 23:00
图 1a 虚线框平均的 (a) 垂直速度 (黑线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)、水平风 (风羽)、比湿 (填色)、温度 (紫线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 的垂直演变和 (b) 降水量时序图
Fig. 8 (a) Vertical evolution of the average vertical velocity (black line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), horizontal wind (barb), specific humidity (colored), and temperature (purple line, unit: $^{\circ}\text{C}$) within the dashed box of Fig. 1a, and (b) time-series of precipitation from 08:00 BT 23 to 23:00 BT 29 July 2025

湿、平均比湿和最小比湿分别进行对比(图 9)。结果表明,本次暴雨过程的 925、850、700 hPa 平均比湿均超过近 10 年来暴雨过程(分别为 14.3、12.2、

$7.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。23 日 08:00 至 29 日 20:00,925 hPa 最大比湿共计 79 h 超过近 10 年来暴雨过程的比湿 90%分位数,占比 50.3%;850 hPa 最大比湿共计

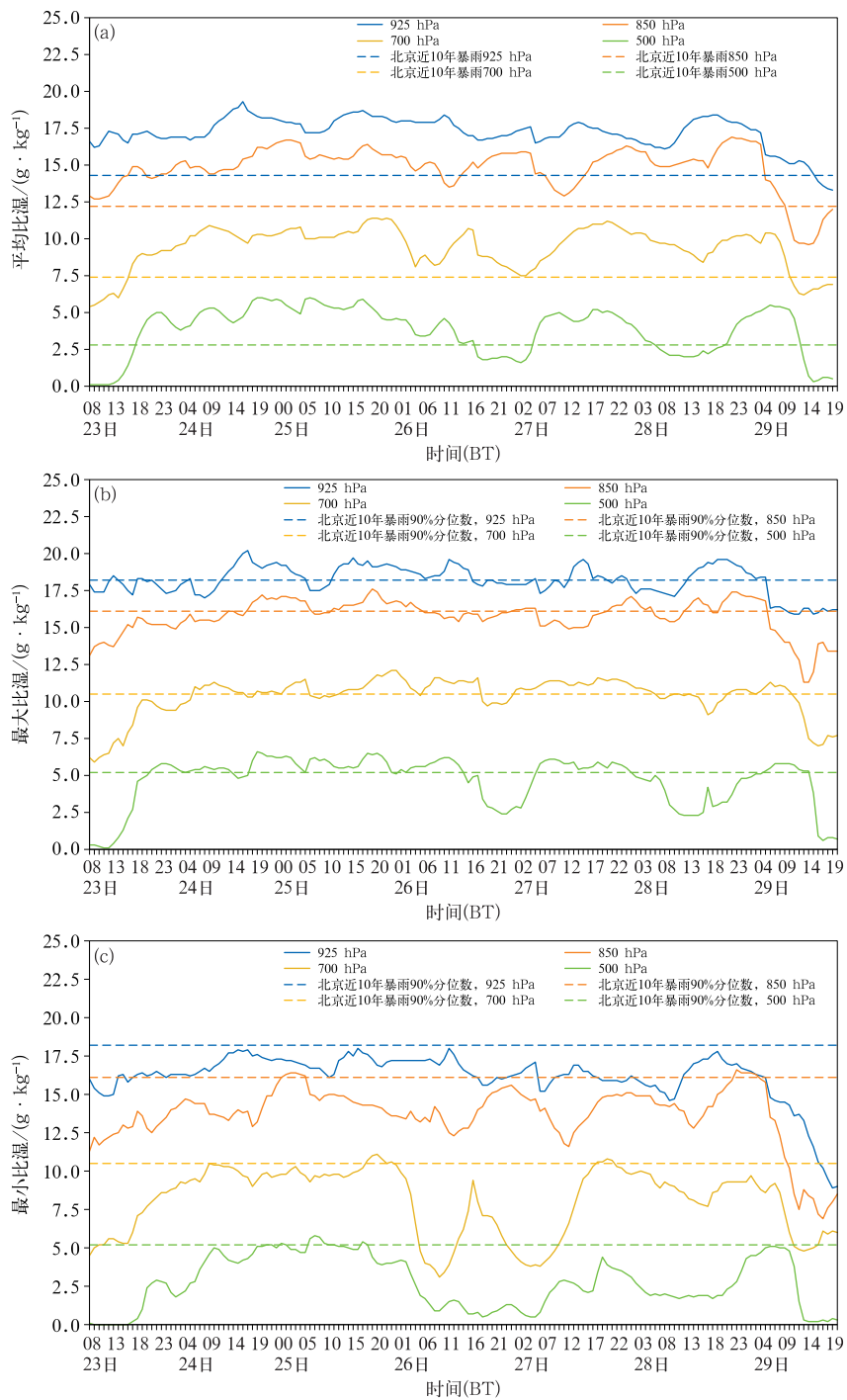


图 9 2025 年 7 月 23 日 08:00 至 29 日 20:00 图 1a 虚线框的 925~500 hPa (a)平均比湿,(b)最大比湿和(c)最小比湿
 Fig. 9 (a) Average specific humidity, (b) maximum specific humidity, and (c) minimum specific humidity in 925—500 hPa of the dashed box in Fig. 1a from 08:00 BT 23 to 20:00 BT 29 July 2025

62 h 超过,占比 39.4%;700 hPa 最大比湿共计 90 h 超过,占比 57.3%;500 hPa 最大比湿共计 85 h 超过,占比 54.1%。最小比湿总体上比近 10 年来暴雨过程的比湿 90%分位数略小。因此,本次暴雨过程在 500 hPa 以下均维持长时间的高湿环境,非常有利于暴雨的维持和发展。

由北京探空站 T - $\ln p$ 图(图 10)可见,整体而言,北京地区白天积蓄不能稳定能量,夜间能量释放并触发暴雨。具体来看,7 月 23 日白天,北京探空站对流有效位能(CAPE)为 $2169.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,存在较大不稳定能量;23 日 20:00(图 10a),北京地区出现降水过程,能量释放,CAPE 降为 $667.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,地面至 400 hPa 湿度条件较好。24 日 20:00(图略),北京自地面至 300 hPa 为深厚湿层,400 hPa 以下已经完全饱和,通州和大兴的大气可降水量(PWV)高达 70 mm,偏北部的密云、平谷 PWV 也

在 68 mm 以上,说明此时具备充足的水汽条件,此时强降水已触发;26 日 14:00,CAPE 和对流抑制能量(CIN)分别为 $2455.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时北京地区已积聚了强烈的不稳定能量,26 日 20:00(图 10b),CAPE 降为 $331.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CIN 升至 $49.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时北京地区已出现降水过程。26 日 20:00,热力、动力和水汽方面相比整个过程其他时间均较弱(表 2),由于此阶段暴雨区域主要位于北京北部山区,密云和怀柔及其以北山区 PWV 均达 60 mm 以上,而北京探空站附近无明显降水过程,此时段北京探空站的代表性有限,不能完全体现此时段暴雨的环境特征,因此增加了 26 日夜间强降水的预报难度。27 日 14:00(图略),北京探空站湿层自地面伸展至 700 hPa,东部和北部的 PWV 在 67 mm 以上,CAPE 达到 $3164.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,中层 600 hPa 高空槽后冷平流显著,抬

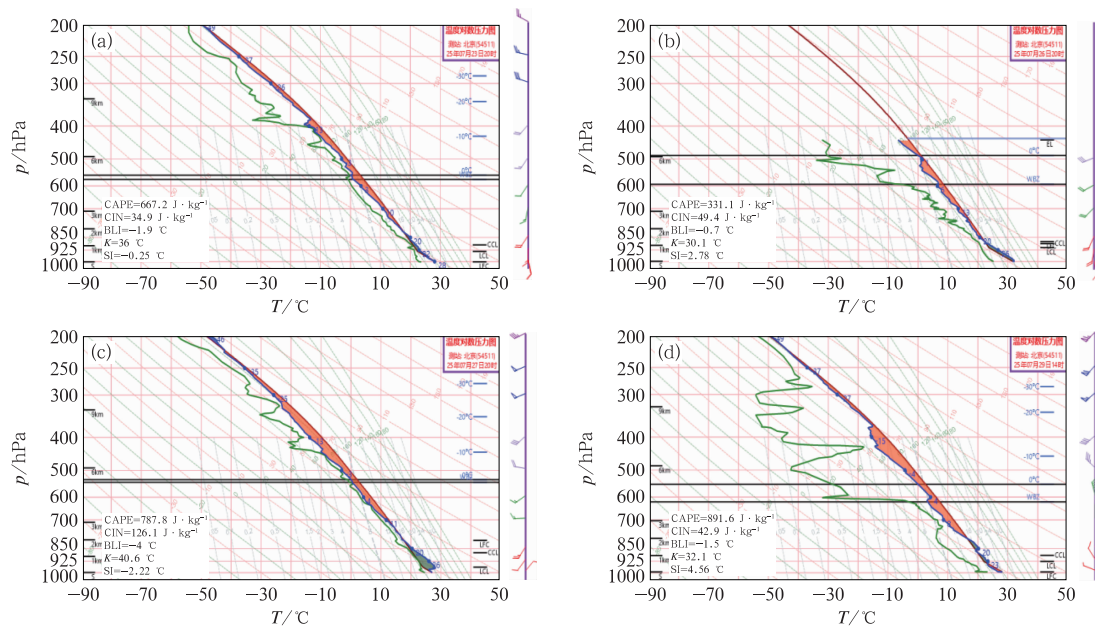


图 10 2025 年 7 月(a)23 日 20:00,(b)26 日 20:00,(c)27 日 20:00,(d)29 日 14:00 北京探空站 T - $\ln p$ 图

Fig. 10 T - $\ln p$ diagram of Beijing Sounding Station at

(a) 20:00 BT 23, (b) 20:00 BT 26, (c) 20:00 BT 27 and (d) 14:00 BT 29 July 2025

表 2 2025 年 7 月 24—28 日 20:00 不同气象要素值

Table 2 Values of different meteorological elements at 20:00 BT from 24 to 28 July 2025

要素	24 日 20:00	25 日 20:00	26 日 20:00	27 日 20:00	28 日 20:00
CAPE/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1557.6	320.2	331.1	787.8	2188.5
CIN/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	42.2	137.7	49.4	126.1	27.3
BLI/ $^{\circ}\text{C}$	-3.6	-3.7	-0.7	-4.0	6.2
LI/ $^{\circ}\text{C}$	-4.32	-1.01	-0.66	-2.60	6.20
$T_{85}/^{\circ}\text{C}$	23.6	21.2	19.4	23.5	25.1
K/ $^{\circ}\text{C}$	43.2	40.2	30.1	40.6	40.5

升凝结高度和自由对流高度较低,大气层结不稳定;27 日 20:00(图 10c),由于此时降水已释放了部分能量,CAPE 虽有所减弱,但也达到 $787.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,湿层从地面伸展到了 500 hPa。29 日 14:00(图 10d),虽然存在一定的不稳定能量,但地面至 500 hPa 为明显的偏北气流控制,湿度条件差,降水结束。

以上分析表明,白天暴雨区域为高温高湿环境,925 hPa 比湿超过近 10 年来暴雨过程最大比湿,深厚的湿层和强 CAPE 共同为本次强降水过程提供了充足的水汽和不稳定能量,而低的 CIN 和抬升凝结高度则有利于对流的触发;夜间伴随着低空急流增强,暴雨增强。但是北京探空站不能完全体现 26 日夜夜间暴雨的环境特征。另外,目前主流的中尺度模式也无法准确预报出 26 日夜夜间极端暴雨过程(图略),25 日 20:00 及 26 日 08:00 CMA-MESO 和 ECWMF 预报降水均较实况偏北、偏西,以上均说明受分辨率影响,再分析资料不能完全反映降水特征。因此本文将利用雷达资料进一步分析此暴雨时段的触发机制。

4.3 雷达回波特征

结合上述分析,将本次暴雨过程分为两个阶段。第一阶段为 23—27 日 20:00,冷空气活动不明显,

以暖区降水为主。第二阶段为 27 日 20:00 至 29 日,27 日 20:00 开始有弱冷空气影响,随后冷空气进一步加强,对流加强,直至 29 日对流减弱消失。

由于 26 日暴雨过程具有一定的特殊性,因此第一阶段以 7 月 26 日暖区降水为例,从雷达组合反射率可见(图 11a),26 日 16:12,系统性降水回波带位于北京的西北侧,并且向东北方向移动;同时在北京密云水库、山谷附近有若干对流云团初生,受高空槽影响,在高温以及大气存在不稳定能量条件的共同作用下,对流云团逐渐发生合并过程,且其强度不断增强,逐渐演变成线状回波,并向东北方向移动。26 日 18:12 之后(图 11b),在燕山山前区域及迎风坡区域,对流云团的合并与增强更为显著,部分区域回波强度可达 60 dBz 以上,且对流云团在山前地区停留时间较长。26 日 19:00 开始两条回波带合并迅速加强,北抬缓慢(图 11c,11d),直至 27 日 01:00 前后回波带一直停滞在暴雨区域上空,其后部不断有新的对流单体生成,并加入到原有的强对流云带中,形成“列车效应”,在后向传播以及燕山地形的影响下,对流云团的生命周期延长,有效地增加了降水量及降水效率,使得本次暴雨的强度更强且持续时间更长。

此外,由 26 日 22:18 的 1.5° 仰角多普勒径向速

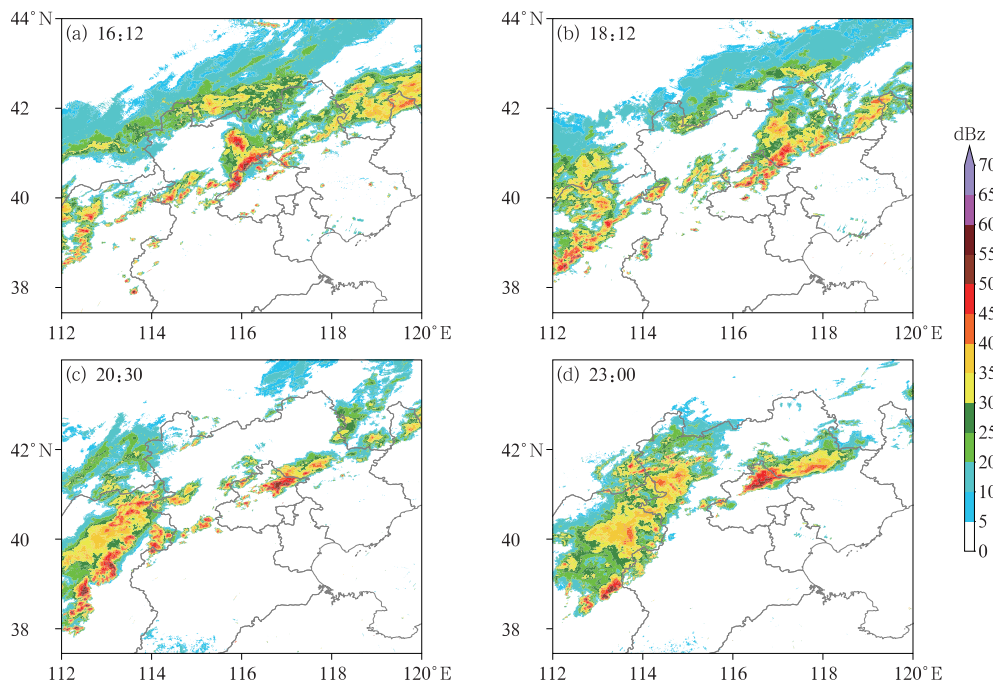


图 11 2025 年 7 月 26 日雷达组合反射率因子

Fig. 11 Radar composite reflectivity factor on 26 July 2025

度可见(图 12b),与强降水回波带对应的是一条风速不连续线,有利于强降水长时间维持。45 dBz 以上回波区大部分位于 5 km 以下,属于低质心回波,降水效率高(图 12c)。从多普勒径向速度剖面可见(图 12d),从低层到高层环境风为正,以南风为主,在回波新生区域 5 km 以下风速为 $10\sim 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明有低空急流存在,而在回波减弱消亡的区域,风速很小;径向速度剖面上低层存在中小尺度的负风速区,正负速度之间具有辐合、辐散,在新生回波一侧为辐合,在减弱一侧为辐散。因此,辐合线、低空急流、低层中小尺度的辐合等天气系统,均有利于回波不断在西侧生成并向东发展移动,从而形成“列车效应”,造成长时间的强降水。26 日 22:00—23:00 降水达到最强,出现 95.3 mm 最大小时降水量(图 1)。

值得说明的是,本次过程受灾最为严重时段正是 26 日夜间北京东北部发生的小范围降水,持续了 6 h 以上,最大小时降水量达 95.3 mm,各数值模式均未能准确预报。从高空观测、地面观测及 ERA5

再分析资料也很难分析出这次强降水的影响系统和动力机制,但从雷达图上可看出,小范围低急流、辐合线是导致“列车效应”形成的主要影响系统。

第二阶段为冷空气影响的强降水,本文以 27 日夜间至 28 日凌晨的降水为例分析。由于冷空气的影响,降水回波单体自西南向东北移动,但回波整体南压,与 26 日回波向东北方向移动有所区别(图 13a)。另外,由于冷空气活动,回波移动较快,因此降水量小于 26 日。此阶段回波影响的范围大,为积层混合状回波,多普勒径向速度以辐合为主,并有大风核存在(图 13b)。反射率因子垂直剖面可见(图 13c),回波单体之间比较松散,属于低质心回波。径向速度垂直剖面可见(图 13d),回波带上 5 km 以下均有 $10\sim 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低空急流存在,西侧低空急流的高度更低,在东侧,由于低层冷空气影响,5 km 以下有负速度区,冷暖交汇形成辐合,因此回波单体在东移南压的过程中持续发展,而后回波移出北京到达河北承德并进一步加强,造成了承德特大暴雨,受灾也十分严重。

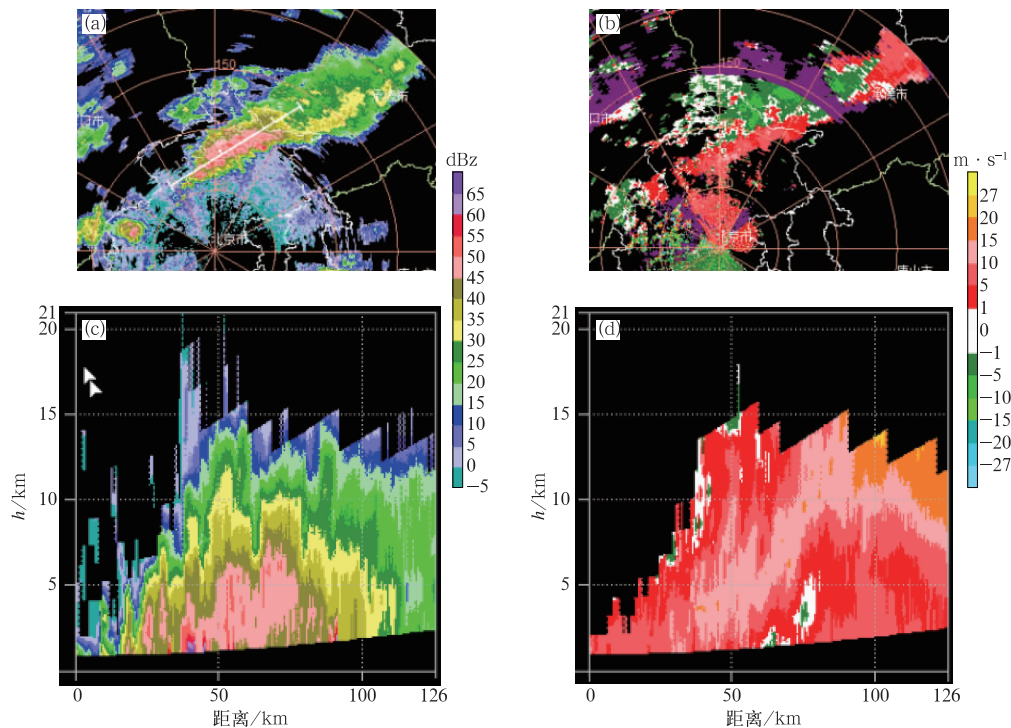


图 12 2025 年 7 月 26 日 22:18(a)组合反射率因子,(b)1.5°仰角径向速度,
(c,d)沿图 12a 实线的(c)反射率因子,(d)径向速度的剖面
Fig. 12 (a) Composite reflectivity factor, (b) radial velocity of 1.5° elevation,
and (c, d) vertical cross-section along the solid line in Fig. 12a for
(c) reflectivity factor and (d) radial velocity at 22:18 BT 26 July 2025

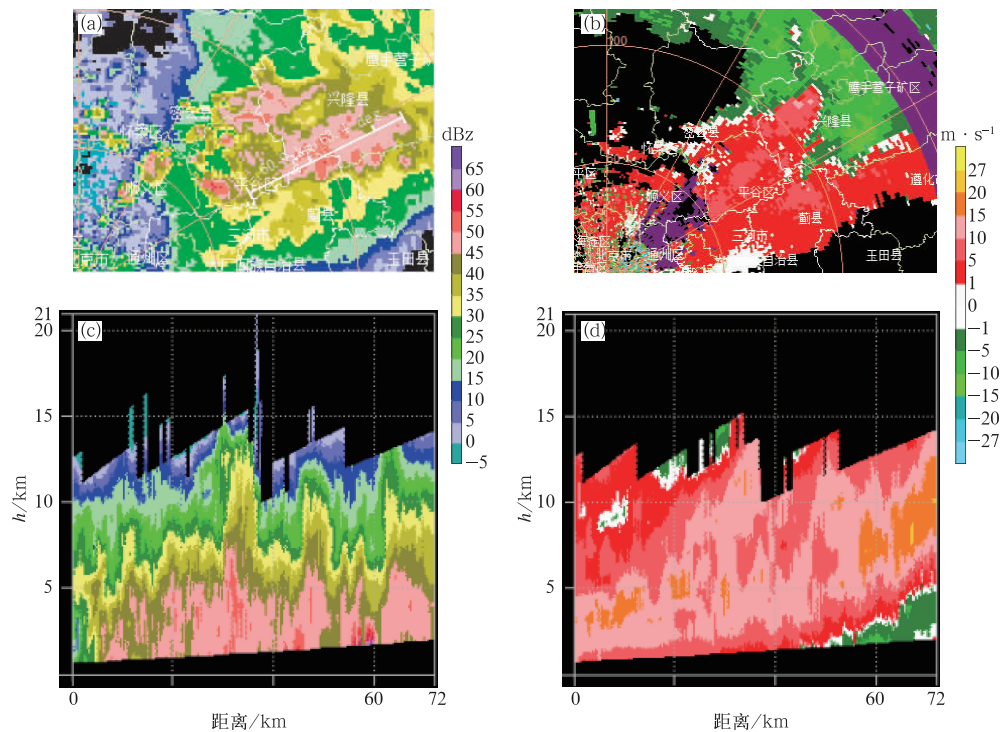


图 13 2025 年 7 月 28 日 03:30(a)组合反射率因子,(b)1.5°仰角径向速度,
(c,d)沿图 13a 实线的(c)反射率因子,(d)径向速度的剖面

Fig. 13 (a) Composite reflectivity factor, (b) radial velocity of 1.5° elevation, and
(c, d) vertical cross-section along the solid line in Fig. 13a for (c) reflectivity factor
and (d) radial velocity at 03:30 BT 28 July 2025

综上所述,26—27 日是暖区暴雨过程,回波不断在西侧生成、东侧减弱,形成长时间“列车效应”,影响范围小,但降水强度大。27 日夜间以后受冷空气影响,转为锋面暴雨,回波移动快,移出北京到达河北承德进一步加强,造成了承德特大暴雨。

5 结 论

本文利用逐小时气象观测、雷达等多源观测数据与 ERA5 再分析数据,以 2025 年 7 月 23—29 日北京暴雨过程为切入点,分析了北京超长极端暴雨的精细化特征与成因,结论如下:

(1)本次暴雨过程持续 7 d,为近 10 年以来北京地区持续时间最长的暴雨过程,日降水量 ≥ 50 mm 的站数和过程日最大降水量仅次于 2023 年 7 月 30 日至 8 月 2 日的台风暴雨过程。本次过程具有显著的夜雨特征。强降水区域主要位于海拔 0~50 m 的燕山山脉前的平原处,其次是位于 600~800 m 的燕山山脉迎风坡地区。

(2)北京地区主要受副高和低纬热带天气系统、

中高纬西风槽影响。从距平场上看,副高较常年异常偏北,热带低压系统与异常偏北的副高外围气流叠加,形成持续的偏南风气流,为极端降水提供充沛水汽;水汽含量显著高于气候平均态,比湿高值区与偏南风距平叠加,加之燕山山脉地形抬升作用,显著增强降水强度。但是,由于 26 日夜间的短时强降水范围较小,局地性较强,再分析数据不能完全反映出 26 日夜间暴雨的特征。

(3)强大的暖湿水汽输送是本次超长极端暴雨持续时间长的原因之一,本次暴雨过程在 500 hPa 以下均维持长时间的高湿环境,整个降水过程的 925、850、700 hPa 平均比湿均超过近 10 年来暴雨过程的平均水平(分别为 14.3、12.2、7.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,北京探空站统计);除 26 日略低外,暴雨过程的其他时段的 500 hPa 以下大气层的最大比湿均大于近 10 年来暴雨过程相应的 90%分位数。高温高湿条件和夜间增强的低空急流,加上地形的抬升作用,使得本次暴雨过程呈现出明显的夜雨特征。

(4)在本次暴雨过程中,ERA5 再分析等常规资料无法分析出 26 日夜间造成“列车效应”极值暴雨

的主要中尺度影响系统,但在雷达图上可清楚地看出,主要的影响系统是低层辐合线与小范围的低空急流。

本文分析了北京超长极端暴雨的精细化特征与成因。发现在复杂下垫面和特殊的天气背景影响下,各数值模式不能准确预报 26 日夜间小范围强降水过程,并且从高空观测、地面观测及 ERA5 再分析资料也很难准确地分析出此类小范围强降水的影响系统和动力机制,而且目前主流的中尺度模式也无法准确预报出这一过程,但从更精细的雷达观测资料上可细致地分析出其影响系统,后续将在此基础上,利用更精细的雷达和卫星等观测手段,针对此类预报难度较大的暴雨过程开展系统性研究。

参考文献

- 包红军,曾思海,王建文,等,2026.基于分布式水文模型的潮白河流域“25·7”洪水模拟[J].气象,52(6):702-712. Bao H J, Zeng S H, Wang J W, et al, 2026. Simulation of the July 2025 flood in Chaobai River Basin based on distributed hydrological model [J]. Meteor Mon, 52(6):702-712(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).
- 陈双,符娇兰,陈涛,等,2026.华北“25·7”暖区极端暴雨对流演变特征差异及环境条件分析[J].气象,52(6):657-672. Chen S, Fu J L, Chen T, et al, 2026. Differences in convective evolution characteristics and environmental conditions of the July 2025 extreme warm-sector torrential rain in North China [J]. Meteor Mon, 52(6):657-672(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).
- 郭丹妮,刘屹岷,吴国雄,等,2023.2021年7月河南极端暴雨事件的位涡诊断和精细化预报[J].大气科学,47(2):534-550. Guo D N, Liu Y M, Wu G X, et al, 2023. Potential vorticity analysis and fine forecast of extreme rainstorm event in Henan Province in July 2021 [J]. Chin J Atmos Sci, 47(2):534-550(in Chinese).
- 金炜昕,孙丞虎,李维京,2014.2012年7月华北降水异常成因分析[J].气象,40(5):541-548. Jin W X, Sun C H, Li W J, 2014. Cause analysis on the precipitation anomalies in North China in July 2012 [J]. Meteor Mon, 40(5):541-548(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).
- 李国翠,铃伟妙,车少静,等,2023.“21·7”特大暴雨系统北上引发太行山中段区域大暴雨成因分析[J].高原气象,42(5):1260-1270. Li G C, Qian W M, Che S J, et al, 2023. Characteristics and synoptic analysis of a regional heavy rain in middle part of Taihang Mountains caused by “21·7” torrential rain system moving northward [J]. Plateau Meteor, 42(5):1260-1270(in Chinese).
- 李晓兰,陈涛,赵玮,等,2025.太行山精细地形对“23·7”华北极端暴雨特征影响的观测分析[J].大气科学,49(3):629-644. Li X L, Chen T, Zhao W, et al, 2025. Observational analysis of mount Taihang's orographic effects on the “23·7” extreme precipitation event in North China [J]. Chin J Atmos Sci, 49(3):629-644(in Chinese).
- 林建,杨贵名,2014.近30年中国暴雨时空特征分析[J].气象,40(7):816-826. Lin J, Yang G M, 2014. Spatio-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981-2010 [J]. Meteor Mon, 40(7):816-826(in Chinese).
- 刘威,杨煜达,张森,等,2025.1668年多台风及华北地区台风远距离暴雨事件研究[J].地理科学进展,44(5):1060-1071. Liu W, Yang Y D, Zhang S, et al, 2025. Multiple typhoons and long-distance rainstorm events in North China in 1668 [J]. Prog Geogr, 44(5):1060-1071(in Chinese).
- 刘艳婕,王晓聪,刘屹岷,等,2025.台风“杜苏芮”(2305)残涡特大暴雨的多模式预报性能比较分析[J].大气科学,49(5):1527-1540. Liu Y J, Wang X C, Liu Y M, et al, 2025. Comparing the performance of multiple operational models in predicting heavy rain caused by the residual vortex of Typhoon Doksuri (2305) [J]. Chin J Atmos Sci, 49(5):1527-1540(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).
- 柳艳菊,丁一汇,张颖娴,等,2015.季风暖湿输送带与北方冷空气对“7·21”暴雨的作用[J].热带气象学报,31(6):721-732. Liu Y J, Ding Y H, Zhang Y X, et al, 2015. Role of a warm and wet transport belt of Asian summer monsoon and cold air from north in the Beijing July 21 heavy rainstorm [J]. J Trop Meteor, 31(6):721-732(in Chinese).
- 马长健,李艳,徐邦琪,2023.双低空急流对“21·7”河南极端暴雨的影响[J].大气科学,47(5):1611-1625. Ma C J, Li Y, Xu B Q, 2023. Impact of double low-level jets on the extreme rainstorm in Henan Province in July 2021 [J]. Chin J Atmos Sci, 47(5):1611-1625(in Chinese).
- 孙建华,齐琳琳,赵思雄,2006.“9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J].气象学报,64(1):57-71. Sun J H, Qi L L, Zhao S X, 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608”

- typhoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(1):57-71(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).
- 汤彬, 王宗明, 胡文婷, 等, 2023. 2021年河南省一次罕见暴雨过程的降水特征及成因[J]. *大气科学*, 47(2):517-533. Tang B, Wang Z M, Hu W T, et al, 2023. Characteristics and causes of precipitation for a rare rainstorm process in Henan Province in 2021[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(2):517-533(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 1-225. Tao S Y, 1980. Heavy Rainfalls in China[M]. Beijing: Science Press: 1-225(in Chinese).
- 田利庆, 李舒文, 邱晓滨, 等, 2024. 一次极端暴雨过程低空急流变化机制分析[J]. *大气科学*, 48(4):1608-1626. Tian L Q, Li S W, Qiu X B, et al, 2024. Variation mechanism of low-level jets during an extreme rainstorm[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(4):1608-1626(in Chinese).
- 万子为, 孙思远, 赵滨, 等, 2024. CMA-MESO模式对“21·7”河南特大暴雨的预报评估与误差分析[J]. *气象*, 50(1):33-47. Wan Z W, Sun S Y, Zhao B, et al, 2024. Evaluation and error analysis of the July 2021 extremely severe rainstorm in Henan Province simulated by CMA-MESO Model[J]. *Meteor Mon*, 50(1):33-47(in Chinese).
- 吴卓亨, 陈静, 张涵斌, 等, 2024. 2021年“7·20”郑州暴雨极端雨强对流尺度集合预报试验[J]. *大气科学*, 48(6):2389-2404. Wu Z H, Chen J, Zhang H B, et al, 2024. Convective-scale ensemble forecast experiment of extreme rainfall intensity for “7·20” severe torrential rain in Zhengzhou, 2021[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(6):2389-2404(in Chinese).
- 徐珺, 杨舒楠, 孙军, 等, 2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J]. *气象*, 40(12):1455-1463. Xu J, Yang S N, Sun J, et al, 2014. Discussion on the formation of a warm sector torrential rain case in North China[J]. *Meteor Mon*, 40(12):1455-1463(in Chinese).
- 徐姝, 易笑园, 熊明明, 等, 2024. 华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J]. *气象*, 50(2):181-194. Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al, 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple β -meso scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China[J]. *Meteor Mon*, 50(2):181-194(in Chinese).
- 杨晓亮, 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).
- 姚秀萍, 李若莹, 2023. 河南“21·7”极端暴雨的研究进展[J]. *气象学报*, 81(6):853-865. Yao X P, Li R Y, 2023. Progress in research of the July 2021 extreme precipitation event in Henan Province, China[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(6):853-865(in Chinese).
- 叶成志, 程锐, 戴泽军, 等, 2025. 边界层涡动输送对郑州“7·20”特大暴雨的影响分析[J]. *气象学报*, 83(5):1258-1270. Ye C Z, Cheng R, Dai Z J, et al, 2025. Impact of PBL eddy transport on the 20 July 2021 Zhengzhou torrential rainfall[J]. *Acta Meteor Sin*, 83(5):1258-1270(in Chinese).
- 余忠水, 2011. 1955—2007年拉萨市雨季节雨率变化特征[J]. *气象*, 37(12):1584-1588. Yu Z S, 2011. The night rain rate variations of Lhasa in rainy season during 1955—2007[J]. *Meteor Mon*, 37(12):1584-1588(in Chinese).
- 张芳华, 孔期, 袁溢, 等, 2024. 河南2021年“21·7”暴雨极端性特征及其与1975年“75·8”暴雨的对比[J]. *大气科学*, 48(6):2405-2423. Zhang F H, Kong Q, Yuan Y, et al, 2024. Extreme characteristics of the “21·7” rainstorm event in Henan Province in 2021 and its comparison with the “75·8” rainstorm in 1975[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(6):2405-2423(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).
- 张江涛, 何丽华, 李江波, 等, 2023. 河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. *大气科学学报*, 46(6):884-903. Zhang J T, He L H, Li J B, et al, 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23·7” extreme rainstorm in Hebei[J]. *Trans Atmos Sci*, 46(6):884-903(in Chinese).
- 张夕迪, 胡艺, 张芳, 等, 2023. 华北地区两次低涡暴雨过程降水特征和成因对比分析[J]. *大气科学*, 47(5):1593-1610. Zhang X D, Hu Y, Zhang F, et al, 2023. Comparative study of the characteristics and causes of two low-vortex heavy rain events in North China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(5):1593-1610(in Chinese).
- 张元春, 孙建华, 傅慎明, 等, 2023. “21·7”河南特大暴雨的中尺度系统活动特征[J]. *大气科学*, 47(4):1196-1216. Zhang Y C, Sun J H, Fu S M, et al, 2023. Active characteristics of mesoscale systems during the heavy rainfall in Henan Province in July 2021[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(4):1196-1216(in Chinese).

(本文责编:俞卫平)