暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

2025年7月下旬华北特大暴雨基本特征及成因初探

陈双 张芳华 刘倍 陈涛 胡宁

Basic characteristics and preliminary causes of the extreme rainstorm over North China in late July 2025

CHEN Shuang，ZHANG Fanghua，LIU Beiyao，CHEN Tao，HU Ning

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-196

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

“23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探

Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China

暴雨灾害. 2023, 42(5): 508-520 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-187

一次华北暖区暴雨的边界层环境条件分析

Analysis of boundary layer environment conditions during a warm-sector rainstorm in North China

暴雨灾害. 2025, 44(2): 156-166 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-014

广西沿海一次冬季暖区暴雨的多尺度能量诊断

Multiscale diagnosis of the energy budget for a warm-sector rainstorm event in winter in the coastal area of Guangxi

暴雨灾害. 2023, 42(3): 283-292 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-094

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析

Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains

暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

2023年4月18日厦门暖区特大暴雨中尺度特征及低空急流的作用

Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023

暴雨灾害. 2024, 43(5): 521-531 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-107

内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析

Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia

暴雨灾害. 2025, 44(2): 177-185 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-096

关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈双,张芳华,刘倍峣,等.2026.2025 年 7 月下旬华北特大暴雨基本特征及成因初探[J].暴雨灾害,45(1):1−14. CHEN Shuang, ZHANG Fanghua, LIU Beiyao, et al. 2026. Basic characteristics and preliminary causes of the extreme rainstorm over North China in late July 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):1−14 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−196

2025 年 7 月下旬华北特大暴雨基本特征及成因初探

陈双[1,2], 张芳华[1], 刘倍峣[1], 陈涛[1], 胡宁[1]

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081)

摘　要: 利用常规高空和地面观测以及 FY-4B 卫星、多普勒天气雷达、ERA5 再分析等资料, 初步分析了 2025 年 7 月 23—29 日华北特大暴雨的基本特征和天气学成因。结果表明: 此次过程降水持续时间长, 降水强度和累计降水量大, 具有一定极端性; 降水空间分布表现为“双雨带、多中心”, 暖区暴雨特征突出, 降雨阶段性和夜雨特征明显。中高纬度平直锋区、西北太平洋副热带高压及其南侧多台风之间形成稳定的形势场, 为持续性强降水提供了有利的天气尺度背景; 三个台风外围远距离水汽接力输送造成的边界层水汽辐合, 是其重要的水汽来源。其中, 26—27 日暖区暴雨发生在天气尺度低空急流减弱背景下, 由多个 β 中尺度对流云团引发。后向传播和系统走向与移向高度重合产生的“列车效应”是短时强降水维持较长时间的重要原因; 冷池-暖湿舌 (或暖脊) 作用及中尺度锋区维持是对流触发和再组织的关键中尺度作用机制, 山前偏南气流辐合增强对流发展是导致密云等山区极端强降水的关键因素。

关键词: 华北; 特大暴雨; 水汽接力效应; 暖区暴雨; 中尺度锋区; 冷池; 列车效应

中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−196

Basic characteristics and preliminary causes of the extreme rainstorm over North China in late July 2025

CHEN Shuang[1,2], ZHANG Fanghua[1], LIU Beiyao[1], CHEN Tao[1], HU Ning[1]

(1. *National Meteorological Centre*, *Beijing* 100081; 2. *State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081)

Abstract: This study investigates the basic characteristics and synoptic causes of extreme rainstorm over North China during 23–29 July 2025 using surface and upper-air observations, FY-4B satellite data, Doppler weather radar data, and ERA5 reanalysis data. The event was characterized by a long duration, high intensity, and large accumulated precipitation, exhibiting a spatial pattern of "double rainbands with multiple centers" and marked warm-sector features. A stable synoptic background formed by a mid–high-latitude straight frontal zone, the northward extension of the western North Pacific subtropical high, and multiple typhoons favored the prolonged rainfall. Relayed moisture transport along typhoon peripheries provided abundant water vapor. Warm-sector rainstorms on 26–27 July were sustained by mesoscale β convective systems.The "train effect", associated with the backward propagation of convective cells and the strong alignment between the orientation and movement direction of the convective system, was a key factor contributing to the longevity of short-term heavy precipitation. Mesoscale processes, including the interactions beteween the cold pool and warm-moist tongue, mesoscale front maintenance, and low-level southerly convergence along the mountain front, further promoted convective initiation and organization.

Key words: North China; extreme rainstorm; water vapor relay effect; warm-sector raintorm; mesoscale frontal zone; cold pool; train effect

引　言

中国是全球暴雨灾害发生最为频繁、影响最为广泛、损失最为严重的国家和地区之一 (於琍等, 2018)。每年盛夏, 随着西北太平洋副热带高压 (以下简称“副高”) 北跳和季风气流加强, 大量暖湿水汽自热带洋面输送到淮河以北, 与中高纬冷空气交汇, 同

收稿日期: 2025−09−29; **定稿日期**: 2025−10−27

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003905, 2024YFC3012404); 灾害天气科学与技术全国重点实验室开放课题 (2025KFA01); 国家自然科学基金项目 (42230612)

第一作者: 陈双, 主要从事暴雨天气机理分析及监测预报技术研究。E-mail: schen520@live.cn

通信作者: 张芳华, 主要从事天气预报理论及相关技术方法研究。E-mail: zfhnmc@126.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

时受华北地区太行山、燕山等山地对气流的抬升和辐合作用，更容易触发和增强暴雨系统，使得华北地区成为我国暴雨的高致灾风险区 (陶诗言，1980；孙岚，1990；张文龙和崔晓鹏，2012；徐祥德等，2024；刘瑾等，2020)。近年来，华北极端暴雨事件频发，无论是小时雨强还是过程累计降水量多次突破历史极值，导致城市内涝、山洪暴发、河流水位急剧上涨，甚至引发泥石流和滑坡等灾害，如 2012 年“7·21”北京特大暴雨、2016 年“16·7”华北特大暴雨、2023 年“23·7”京津冀特大暴雨等。

早在 20 世纪 80 年代初，陶诗言 (1980) 就归纳出华北暴雨“大尺度环流背景引导-关键天气系统配置-中尺度触发机制-地形增幅作用”的概念模型，并被应用在暴雨预报。这表明一次显著的暴雨过程往往是多尺度系统相互作用的结果 (陶诗言等，2003；孙建华等，2013)。此后科研业务人员基于不同典型暴雨个例，从多角度诊断分析了不同环流系统对华北暴雨特别是极端暴雨的作用和贡献。

地理位置和地形分布的特殊性，决定了华北暴雨环流形势和影响系统的区域特征。在华北暴雨诸多影响系统中，台风直接或者远距离水汽输送是最重要的因素之一 (丁一汇，2015；寿绍文，2019)。边清河等 (2005) 的统计结果表明，由台风引起的华北暴雨平均约为一年一次，且主要出现在盛夏。个例诊断进一步证明了台风水汽输送的重要贡献，如，9608 号台风低压与副高之间形成的强偏南风低空急流将低纬地区高温高湿空气源源不断地向华北输送，导致了“96·8”特大暴雨 (江吉喜和项续康，1997；孙建华等，2006)；2021 年北京“7·21”暴雨过程也有台风“韦森特”的水汽输送贡献 (徐洪雄等，2014)。2023 年 7 月受台风“杜苏芮”残涡北上停滞和台风“卡努”接力水汽输送影响，配合太行山地形效应，京津冀地区出现持续性特大暴雨，过程最大累计降水量超过 1 000 mm，导致严重次生灾害，海河流域出现“96·8”以来首次流域性大洪水 (张芳华等，2023；唐永兰等，2024；Xia et al.，2025；杨浩，2025)。

此外，发生在副高边缘、无明显冷空气影响的暖区暴雨也是华北暴雨的特点之一，甚至可能直接导致极端强降水。暖区暴雨的概念最早由黄士松 (1986) 针对华南前汛期暴雨提出，其具有雨强大、局地性强、突发性强等特点，斜压性强迫不明显，常与副高、急流等密切相关，水汽输送充沛，且边界层触发机制复杂，常受到地形影响。2012 年北京“7·21”暴雨 (谌芸等，2012，孙继松等，2012；Zhang et al.，2013)、2018 年北京“7.16”暴雨 (雷蕾等，2020；于超等，2022) 等均是暖区暴雨典型个例。近年来从业务和研究中也发现，在天气尺度系统强迫较弱，甚至低空急流减弱的背景下，仍然可能由暖区对流产生极端强降水 (符娇兰等，2023)，这无疑给天气预报带来更大困难。

2025 年 7 月 23—29 日，华北再次遭遇极端强降雨，内蒙古中部、北京、河北中北部等地出现持续性暴雨到大暴雨，局地特大暴雨，降雨强度和持续时间均为历史罕见。北京密云，河北保定易县、承德兴隆等山区累计降水量超过 500 mm，导致严重次生灾害。根据应急管理部统计，此次过程造成京津冀晋 89.4 万人次受灾，其中北京因灾死亡 44 人，失踪 9 人。强降雨呈现出“双雨带、多中心”特点，暖区暴雨特征显著，且在天气尺度急流减弱的情况下，暖区暴雨却发展加强，精准预报难度极大。本文拟从降水时空特征及天气学成因对此次特大暴雨过程开展分析，重点探讨弱强迫背景下暖区对流触发和发生发展机制，以期为后续深入研究提供基础信息，并可为此类暴雨预报预警提供参考。

1 资料说明

本文采用的观测资料主要包括国家气象信息中心天擎系统提供的常规地面和高空观测资料，逐小时地面自动站资料，空间分辨率为 4 km 的 FY-4B 卫星红外亮温 (TBB) 资料；中国气象局气象探测中心的雷达拼图资料。诊断分析采用欧洲中期数值预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF) 的第五代全球再分析资料 (the Fifth Generation of ECMWF Atmospheric Reanalyses of the Global Climate，ERA5)，时间分辨率为 1 h、空间分辨率为 0.25°×0.25°。

2 降水实况

2.1 强降水过程总体特征

基于对国家和区域气象观测站点 (以下分别简称国家站和区域站) 资料的分析可知，2025 年 7 月 23 日 08 时—30 日 08 时 (北京时，下同)，陕西北部、山西北部、河北中北部、北京、天津北部、内蒙古中东部等地出现强降水，降水空间分布呈现“双雨带、多中心”特征，100 mm 以上强降水覆盖区域达 30.48×10^4 km^2。由锋面系统造成的北侧雨带分布范围更广，但其 250 mm 以上区域相对较小，最大降水中心出现在内蒙古呼和浩特新城区，达 380.9 mm；南侧位于副高边缘的暖区强雨带降水强度则更大，河北中部和东北部、北京东北部等地出现多个 250 mm 以上强降水中心，局地累计降水量超过 400 mm，最大值为 650.2 mm，出现在河北承德兴隆县六道河站 (图 1)。

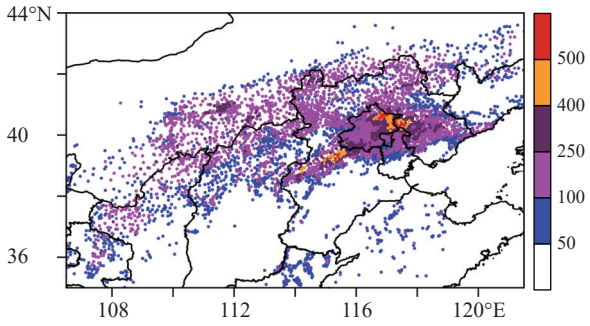


图 1 2025 年 7 月 23 日 08 时—30 日 08 时华北累计降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of cumulative precipitation over North China from 08:00 BT on 23 July to 08:00 BT on 30 July 2025

此次过程日降水量 (当日 08 时—次日 08 时) 和累计降水量具有显著极端性。从单日降水看, 内蒙古、河北等地 12 个国家站日降水量突破历史极值, 绝大部分位于内蒙古中部偏南地区 (图 2), 河北中部和东北部、北京东北部多地出现日降水量超过 250 mm 的特大暴雨, 最大 24 h 降水量 451.5 mm, 出现在河北保定易县仁义庄站。从过程累计降水量看, 河北保定易县和阜平、承德兴隆以及北京密云上甸子等站降水量远超 7 月下旬历史同期, 距平百分率达 400% 以上; 北京全市国家站平均降水量 213.5 mm, 是常年同期平均降水量的 2.84 倍, 相应的旬累计降水量位列历史第 4 位; 密云和平谷过程平均降水量分别达 362.7 和 350.1 mm, 有 13 个站点累计降水量超过 500 mm, 其中最大为密云郎房峪,累计降水量 574.3 mm, 占常年总降水量的 92%, 超过常年汛期总量。

强降水过程还具有降水时间长、对流特征显著等特点。在图 1 所示 100 mm 以上的强降水区,累计降水时长普遍在 30 h 以上, 南北两条雨带均有部分站点超过 50 h (图略)。以北京市为例, 降水累计时长达 147 h, 超过“杜苏芮”台风残涡造成的“23·7”极端强降水过程 (83 h), 也超过此前历史第一位的“63·8”过程 (144 h) (杨舒楠等, 2023) 而跃居历史首位。南侧雨带的对流特征更为显著, 过程期间小时降水量超过 50 mm、80 mm 以上的站点主要分布在河北西部和东北部、北京北部等地, 与地形关系密切, 多在太行山和燕山的偏南风迎风坡一侧 (图 2); 河北 6 个站点小时降水量达 100 mm 以上, 最大出现在河北保定阜平周家湾, 达 125.6 mm (表 1), 3 个国家站小时降水量突破历史极值, 可见其小时降水量也具有极端性。此外, 其最大 3 h 降水量 (224.8 mm) 与“23·7”极端强降水过程接近, 最大 6 h 降水量 (374.3 mm) 超过“23·7”极端强降水过程, 进一步凸显出此次过程的极端性。

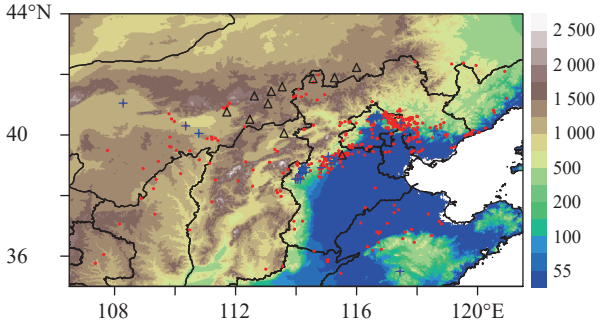


图 2 2025 年 7 月 23 日 08 时—30 日 08 时华北日降水量突破历史极值的站点 (空心三角形)、≥50 mm·h^{-1} (红色圆点)、≥80 mm·h^{-1} (蓝色十字) 站点及地形 (填色, 单位: m)

Fig. 2 Spatial distribution of stations where daily precipitation exceed historical extremes (open triangles), ≥50 mm·h^{-1} (red circles), and ≥80 mm·h^{-1} (blue crosses) over North China from 08:00 BT on 23 July to 08:00 BT on 30 July 2025, and topography (shaded, unit: m)

表 1 “25.7” 与“23.7”暴雨过程华北不同时长最大降水量对比

Table 1 Comparison of maximum precipitation over different periods in North China during the “25·7” and “23·7” heavy rainfall events

时长	“25·7”暴雨		“23·7”暴雨	
	量值/mm	发生地点	量值/mm	发生地点
1 h	125.6	河北保定阜平	111.8	北京丰台
3 h	224.8	河北保定阜平	226.3	北京大兴
6 h	374.3	河北保定阜平	258.5	北京大兴
24 h	451.5	河北保定易县	685.5	河北邢台临城
过程累计	650.2	河北承德兴隆	1 003.4	河北邢台临城

注: 基于中国气象局天擎大数据云平台区域气象站观测数据统计, 其中“25.7”暴雨统计时段为2025年7月23日08时—30日08时, “23.7”暴雨统计时段为2023年7月29日08时—8月2日08时,统计时段为滑动窗口。

2.2 降水时段划分及其演变特征

过程期间出现多个大到暴雨、局地大暴雨或特大暴雨日, 暖区暴雨特征突出, 降水强度和影响范围均具有一定阶段性特征。根据逐日降水变化和主要影响系统演变, 可将此次强降水过程大致划分为三个阶段。

第一阶段为 7 月 23—25 日 (图 3a—c), 是典型的“双雨带”阶段。北侧锋面雨带覆盖陕西北部至内蒙古中部偏南地区, 南侧暖区雨带则自河北中部延伸至北京东北部、河北东北部, 上述大部地区累计降水

量均超过 100 mm, 其中, 内蒙古呼和浩特、河北保定等地累计降水量达 250 mm 以上。24 日华北暖区暴雨开始显著发展, 河北中部和东北部、北京东部和南部出现暴雨到大暴雨, 其中有 29 个测站出现特大暴雨, 且多数集中在河北易县, 导致严重次生灾害。国家站最大日降水量出现在河北易县 (362.6 mm), 突破历史极值; 区域站最大日降水量出现在河北易县仁义庄站, 达 448.7 mm。25 日锋面降水发展, 内蒙古中部偏南地区、河北北部等地出现大范围暴雨到大暴雨, 其中有 10 站出现特大暴雨, 有 8 个国家站日降水量突破历史极值; 此时暖区暴雨范围明显减小, 但保定局地仍出现了日降水量 300 mm 以上的强降水; 最大日降水量出现在河北阜平, 达到 382.2 mm, 亦突破历史极值。

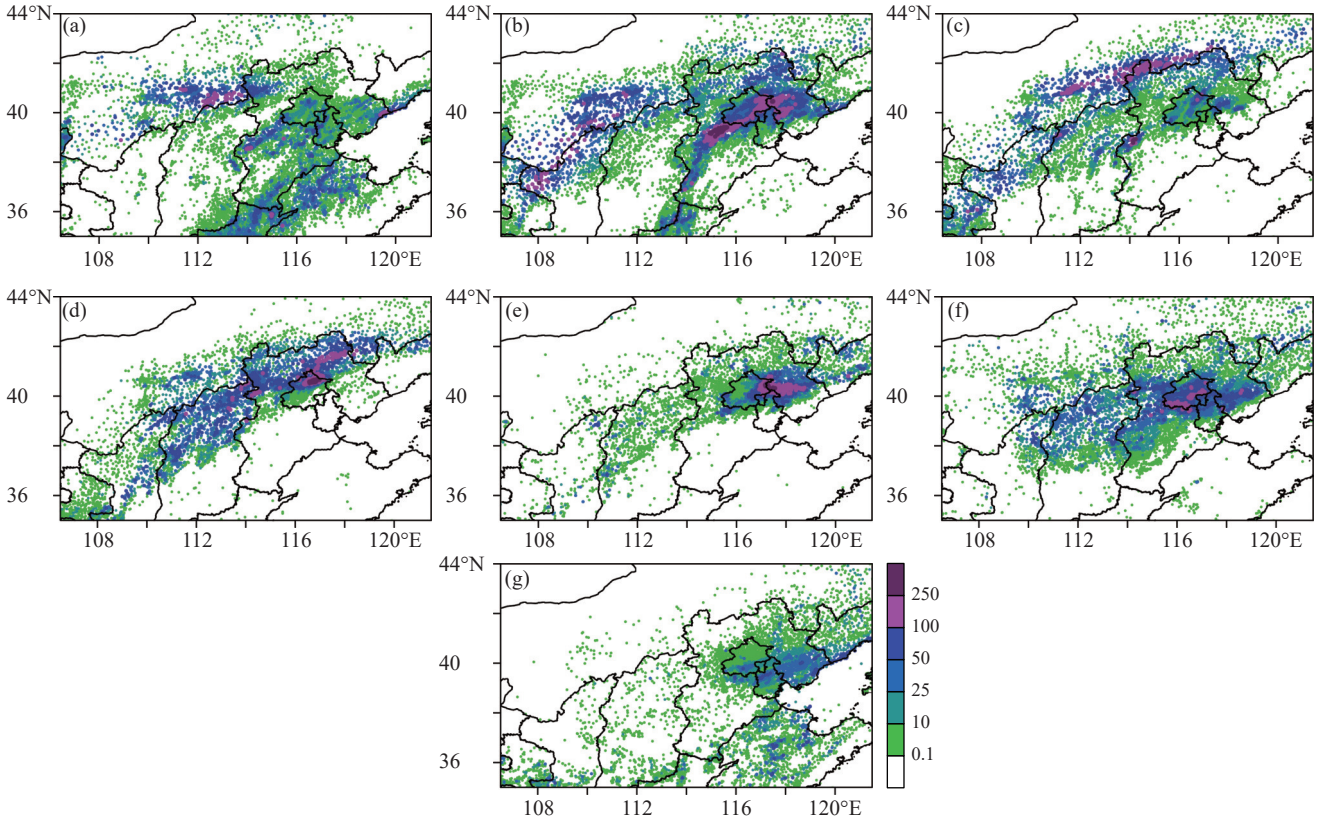


图 3 2025 年 7 月 23 日 (a)、24 日 (b)、25 日 (c)、26 日 (d)、27 日 (e)、28 日 (f)、29 日 (g) 华北日降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of daily precipitation (unit: mm) on (a) 23 July, (b) 24 July, (c) 25 July, (d) 26 July, (e) 27 July, (f) 28 July, and (g) 29 July 2025

第二阶段为 7 月 26—27 日 (图 3d—e), 此阶段北侧锋面系统明显减弱, 是副高边缘弱天气系统强迫下的暖区暴雨阶段。暴雨中心出现在山西北部、河北北部至北京北部等地, 且呈现逐日南压趋势。虽然降水范围较第一阶段减小, 但强度非常大且集中, 26 日和 27 日各有 17 站和 21 站出现特大暴雨, 分别集中在北京密云和河北兴隆, 最大日降水量出现在兴隆六道河站, 达 396 mm。上述地区继 24—25 日出现暴雨到大暴雨天气以来, 再次出现如此集中的特大暴雨, 加之山区复杂地形和下垫面的影响, 诱发了严重的山洪、泥石流、中小河流洪水等灾害, 密云水库出现历史第二洪峰, 潮白河出现密云水库建库以来最大行洪流量。

第三阶段为 7 月 28—29 日 (图 3f—g), 此阶段主要为高空槽东移南下造成的系统性降水, 北京大部、河北中部等地再次出现大到暴雨, 部分地区大暴雨。28 日强降水范围和强度较 29 日大, 但较前两个阶段而言, 降水强度明显减弱, 没有出现特大暴雨, 最大日降水量出现在北京房山石楼站, 达 203.1 mm。29 日降水明显减弱东移, 此次华北持续性强降水过程结束。

2.3 降水强度阶段性和日变化特征

图 4 给出此次过程逐 3 h 累计的 ≥20 mm·h^{-1} 和≥50 mm·h^{-1} 站次演变。分析可知, 此次过程的最强降水时段出现在第一阶段 24 日夜间, 3 h 累计的≥50 mm·h^{-1} 站次最多达 52 站次。这与该日暖区暴雨处于发展盛期、对流活动异常显著密切相关。第二阶段中, 26 日和 27 日夜间≥50 mm·h^{-1} 站次在 25 日减弱的基础上再度增多, 表明对流强度再次增大。进入第三阶段, 尽管≥20 mm·h^{-1} 站次仍维持在较高

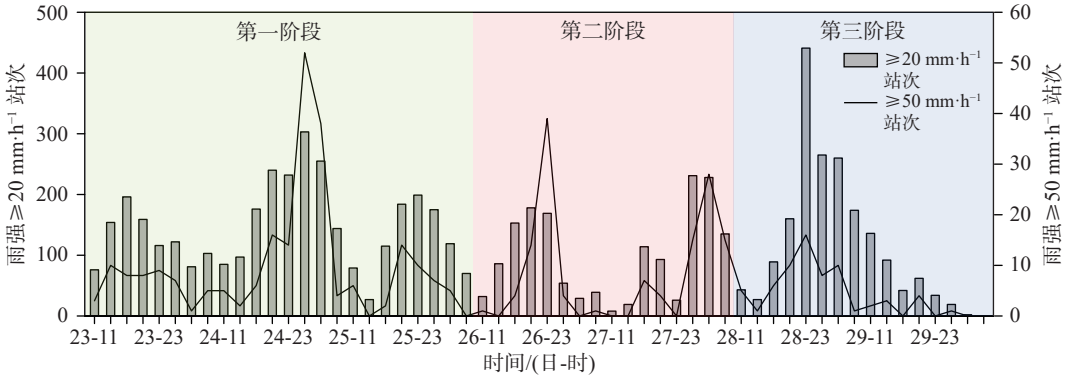


图 4 2025 年 7 月 23 日 08 时—30 日 08 时区域 (35°—45°N、106°—122°E) 内逐 3 h 累计的雨强≥20 mm·h^{-1}、≥50 mm·h^{-1} 站次

Fig. 4 Temporal variations of 3 h accumulated station counts for hourly rainfall intensity ≥20 mm·h^{-1}、≥50 mm·h^{-1} in the region (35°–45°N, 106°–122°E) from 08:00 BT 23 July to 08:00 BT 30 July 2025

水平, 但≥50 mm·h^{-1} 站次已显著减少。进一步分析其日变化显示, 强降水主要集中发生在夜间, 以 20 时至次日 05 时前后最为突出, 表明此次过程强降水具有典型的夜雨特征, 与其暖区对流性质相一致。

3 环流形势和系统演变

此次过程期间, 亚洲中高纬为平直纬向环流, 锋区底部有分裂短波南下影响华北北部, 同时副高呈带状分布, 位置较常年同期偏北, 110°—130°E 副高脊线在 35°N 附近南北摆动, 其南侧热带系统活跃, 过程期间先后受到 3 个台风活动影响, 分别是当年第 7 号台风“范斯高”、第 8 号台风“竹节草”和第 9 号台风“罗莎”, 台风外围偏东风接力有利于暖湿气流持续北上。在南北方向“三足鼎立”的稳定环流条件下, 冷暖空气在西北地区东部至内蒙古中部、华北频繁交汇, 为持续性强降水的发生发展提供了有利的环境条件。

第一阶段 (图 5a—c), 北支锋区东南侧在蒙古国东南部和我国内蒙古东北部分别有低涡切变线生成, 形成贯穿河套地区至内蒙古中部、华北北部等地的辐合系统; 南海和菲律宾以东洋面台风系统活跃, 台风“范斯高”和“竹节草”互旋形成准南北向辐合带, 5 880 gpm 等位势高度线随之逐渐北抬至河北中部至北京一带。副高缓慢北抬有利于北支锋区上的辐合系统在南北方向上的维持, 从而有利于陕西北部、内蒙古中部偏南地区及河北北部等地出现锋面性质的强降水。同时, 副高边缘在 850 hPa 及 925 hPa 均出现低空急流, 且呈现出明显日变化特征, 为河北中部至北京地区的暖区暴雨提供了必要的水汽和触发条件, 整层可降水量最大值超过 70 mm (图略), 与多次华北极端强降水过程中的数值相当 (张芳华等, 2023)。值得注意的是, 850 hPa 偏南风最大在 15 m·s^{-1} 左右, 相比已发生的极端强降水过程并不算强, 但急流强度变化导致低层辐合, 且河北中部至北京一带在 200 hPa 上位于西风急流与南亚高压东侧偏北风之间的强辐散区 (图略), 高层抽吸作用使得低层上升运动加强。

第二阶段 (图 5d—e), 北支锋区上的短波槽继续东移, 副高经历了由稳定维持到逐渐减弱东退的过程, 二者间气压梯度较前期减小, 副高外围低层偏南气流减弱, 华北北部位于偏南风与偏东风之间的切变线南侧; 台风“范斯高”减弱停止编号, 但台风“罗莎”北上, 与“竹节草”外围的偏东南风逐渐合并, 在 925 hPa 形成一支显著的水汽通道, 沿副高外围输送至华北中北部。此阶段低层风场较弱, 无明显天气尺度低空或边界层急流, 系统强迫总体较弱, 整层可降水量最大值在 65 mm 左右。水汽和动力条件均不及第一阶段, 但在北京、河北仍出现暖区极端强降水, 成为此次过程最难预报的阶段, 也表明其中有重要的中尺度作用机制。

第三阶段 (图 5f—g), 西风带横槽转竖并南压, 携带冷空气南下影响华北地区, 副高进一步东退。华北地区受高空槽和低层低涡切变线系统影响, 加上台风远距离水汽输送的作用, 具备产生强降水的水汽、热力和动力条件。同时, 台风外围由偏东风转向的偏南气流也有利于低层辐合系统的稳定维持, 使得降水时间延长。29 日夜间, 随着高空槽过境, 副高继续东撤, 华北转为槽后西北气流控制, 此次强降水过程结束。

以上分析表明, 此次过程发生在稳定的环流形势下, 中纬度弱冷空气与异常偏北的副高边缘暖湿气流频繁交汇, 台风“范斯高”、“竹节草”和“罗莎”的外围环流在副高南侧形成水汽接力效应, 共同建立了从太平洋经我国东部海区至华北的水汽输送通道, 是此次华北特大暴雨发生的环流背景。

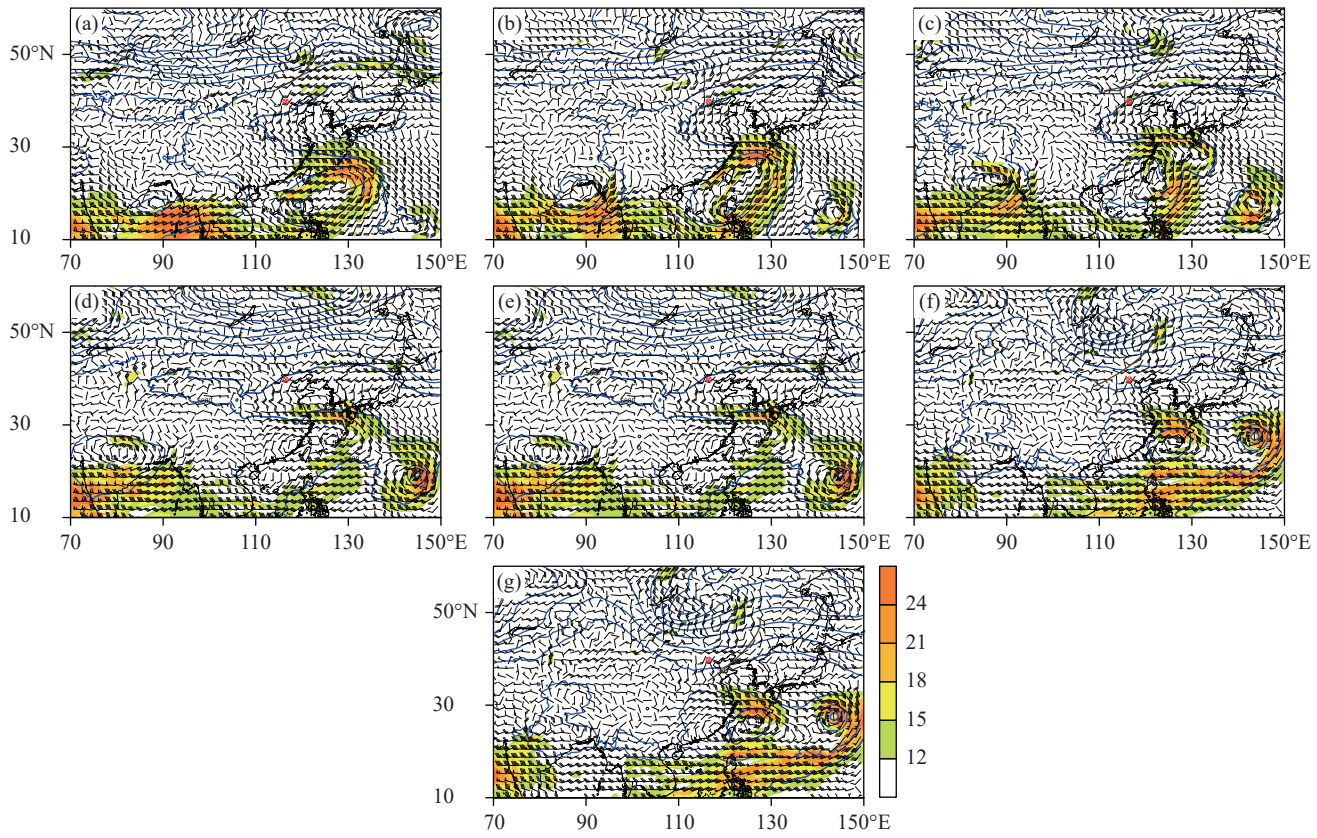


图 5 2025 年 7 月 23 日 (a)、24 日 (b)、25 日 (c)、26 日 (d)、27 日 (e)、28 日 (f)、29 日 (g) 20 时天气形势图 (蓝色等值线为 500 hPa 位势高度, 其中蓝色粗实线为 5 880 gpm 等位势高度线, 单位: gpm; 风杆表示 850 hPa 风场, 其中填色表示风速≥12 m·s^{-1}; ⊗ 表示北京所在位置, 棕色粗实线表示地面冷锋)

Fig. 5 Weather map at 20:00 BT on (a) 23, (b) 24, (c) 25, (d) 26, (e) 27, (f) 28, and (g) 29 July 2025 (Blue contour lines represent 500 hPa geopotential height, with the thick blue solid line indicating the 5 880 gpm geopotential height contour, unit: gpm. Wind barbs denote the 850 hPa wind field, with shading indicating wind speeds ≥12 m·s^{-1}. ⊗ marks the location of Beijing, and the thick brown solid line represents the surface cold front)

4 第二阶段强降水成因初探

考虑到第二阶段 (26 日 08 时—28 日 08 时) 极端强降水发生在弱天气尺度系统强迫的背景下, 且强降水落区集中、强度很大, 降水叠加效应造成的灾害损失和社会影响尤为严重; 同时预报难度和不确定性很大, 数值模式对此基本没有预报能力 (图略)。因此, 对该阶段强降水的中尺度物理机制重点分析如下。

4.1 中尺度云团演变特征

直接造成暴雨的天气系统是中尺度天气系统, 极端暴雨的出现往往伴随反复出现的中尺度对流云团或中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS), 此次极端强降水的发生同样受到多个中尺度对流云团影响。图 6 和图 7 所示分别为 26 日和 27 日 FY-4B 红外通道 TBB 演变。

由上述分析可知, 26 日降水集中在 26 日午后至前半夜 (图 4), 由午后自山西北部生成并发展的 MCS 自西向东移入北京、同时在其后部不断触发新生的对流云团所致, 主要影响北京北部的怀柔、密云等地 (图 6a—f)。期间, 先后有 4 个中尺度对流云团 (A—D) 影响北京北部地区, 以 β 中尺度对流云团为主, TBB 中心最低达 −62 ℃ 以下, 表明其对流发展十分旺盛, 其中云团 A 为北京西部移入的对流系统, B—D 则为沿着东北—西南方向后向传播生成的对流系统。最强降水时段出现在云团 C、D 快速发展期, 山前区域短时强降水站次显著增多 (图 6c—d), 同时出现≥80 mm·h^{-1} 的短时强降水天气 (图 2), 对应该日降水最强时段 (20—23 时)。

27 日降水则对应下午及后半夜两个阶段 (图 4), 分别由午后和夜间北京局地生成的多个中尺度对流云团自西南向东北方向移动造成, 主要影响北京密云、平谷及下游的河北兴隆等地。在此期间, 先后伴有多个对流云团局地新生过程, 仍以 β 中尺度对流云团为主, 但 TBB 中心较少出现低于 −62 ℃(图 7a—f), 表明对流强度不及 26 日, 对应 50 mm·h^{-1} 短时强降水站次也比 26 日少 (图 4)。其中, 27 日午后对流新生位置更偏东, 持续时间也更短, 表现为午后局地

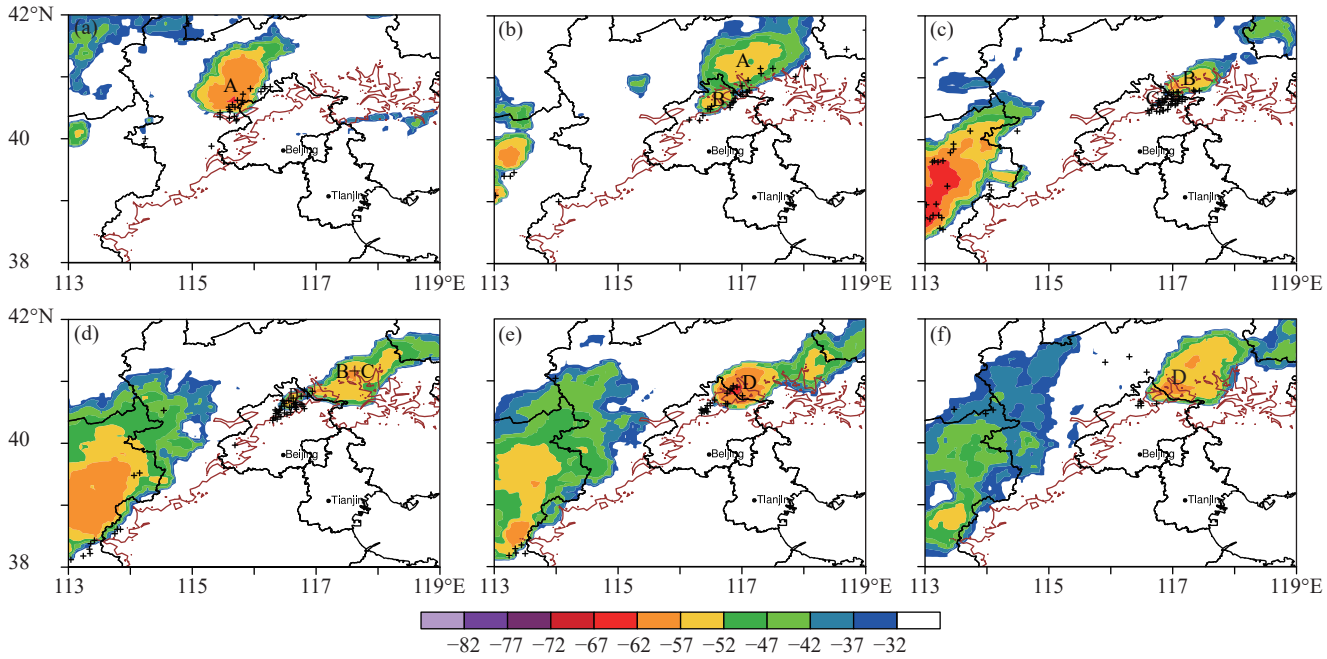


图 6　2025 年 7 月 26 日 15 时 (a)、18 时 (b)、20 时 (c)、22 时 (d)、23 时 (e) 及 27 日 00 时 (f) FY-4B 卫星红外云顶亮温 (填色, 单位: ℃) 空间分布 (棕色粗实线表示 500 m 等高度线; " +"表示后 1 h≥20 mm·h^{-1} 站点分布; A、B、C、D 分别表示云团)

Fig. 6 Spatial distribution of FY-4B infrared cloud-top brightness temperature (shaded, unit: °C) at (a) 15:00 BT, (b) 18:00 BT, (c) 20:00 BT, (d) 22:00 BT, (e) 23:00 BT on 26 July and (f) 00:00 BT on 27 July 2025 (Thick brown line is the 500 m contour, "+" marks stations with ⩾ 20 mm rainfall for the next hour. A, B, C, and D respectively represent cloud clusters)

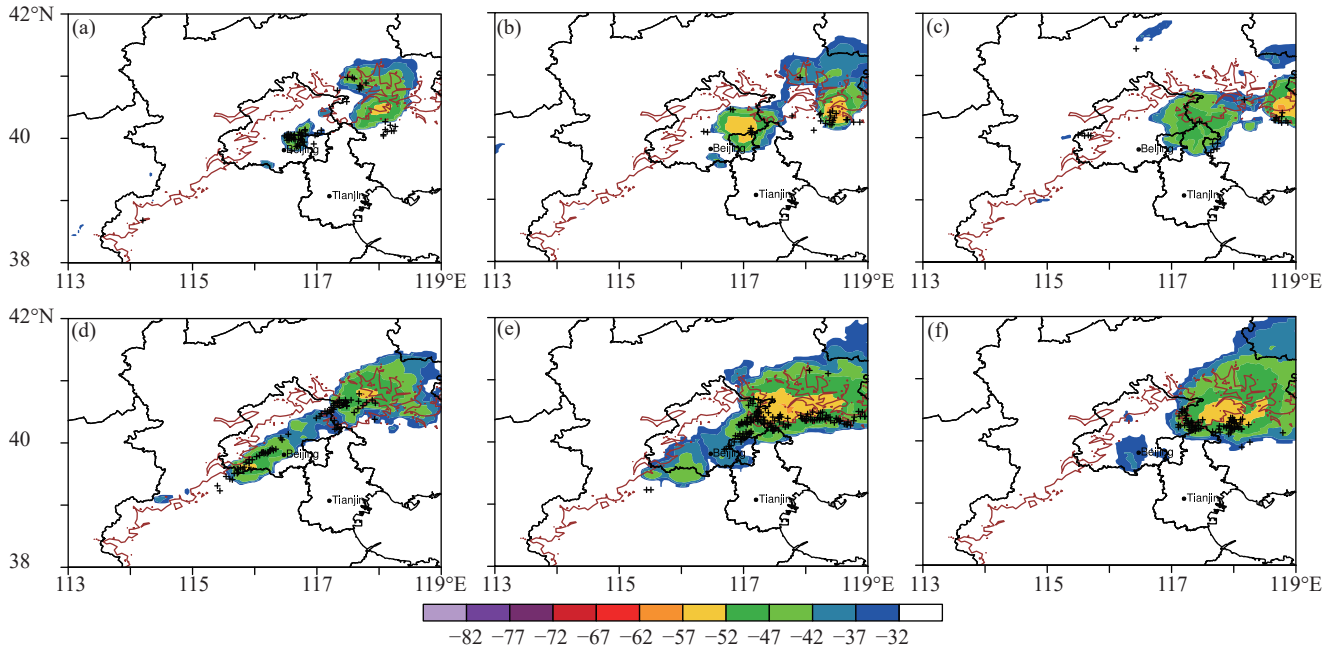


图 7 同图 6, 但分别为 2025 年 7 月 27 日 15 时 (a)、16 时 (b)、17 时 (c) 及 28 日 00 时 (d)、02 时 (e)、04 时 (f)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for (a) 15:00 BT, (b) 16:00 BT, and (c) 17:00 BT on 27 July, and (d) 00:00 BT, (e) 02:00 BT, and (f) 04:00 BT on 28 July 2025

短时对流, 对流性降水范围较小、强度也不大 (图 7a—c); 夜间对流新生位置则更偏西, 与地形关系更密切, 表现为东北—西南走向线状中尺度系统伴随的"列车效应", 对流性降水范围和强度更大, 持续时间也更长 (图 7d—f)。最强降水主要由移入河北兴隆获得发展的云团后部产生 (图 7f), 对应该日最强时段 (02—05 时)。

综上, 26—27 日北京密云等地的极端强降水主要由 β 中尺度对流云团造成, 呈多阶段演变。26 日的极端强降水是由多次后向传播的对流云团依次触发及合并引发; 27 日包括午后局地短时对流以及后半夜东北—西南走向线状中尺度系统伴随的"列车效

应”产生的持续性强降水。连续对流触发、后向传播及系统走向与移向的高度重合，导致“列车效应”，是本阶段持续强降水的主要成因。

4.2 有利的热力不稳定条件

各种天气系统的发生发展都伴随大气能量转换。大气中能量主要包括动能、位能、感热能和潜热能，可以用总湿静力能 (Hobbs and Wallace, 2006) 表示，暴雨和对流天气常发生在高能比轴附近 (朱乾根等, 2000)；极端强降水通常发生在不稳定层结状态下，与强烈垂直上升运动往往伴随的不稳定能量释放有关。因此，分析能量分布和层结状态，对于认识极端强降水发生潜势十分重要。

图 8 显示了 26—27 日主要降水阶段前期 850 hPa 假相当位温以及 1 000—500 hPa 总湿静力能分布。分析可知，内蒙古受北方大陆气团影响，河北南部、山东半岛以及渤海等受副热带气团影响，北京、河北中北部位于两个气团之间，受副高外围西南暖湿季风气流持续输送影响，高温高湿能量在此聚集，形成东西向狭长高能区，为极端强降水提供了有利的热力背景。26 日 14 时 (图 8a)，副高位置偏北，暖湿气流前沿亦偏北，形成自山西中北部延伸至河北北部的西南—东北向暖湿舌，对应总能量高值带，850 hPa 假相当位温值达 360 K 以上，1 000—500 hPa 总能量达 174 000 KJ·kg^{-1}，北京西部和北部处于该暖湿舌南侧的能量锋区，有利于对流发生；27 日 20 时 (图 8b)，随着北方大陆气团南压、副高南撤，暖湿舌与高能带整体南移，北京及河北东北部仍位于高能区附近。

受上述低层暖湿输送影响，北京地区大气层结处于高度不稳定状态。在当日对流发生前，26 日 14 时 (图 8c) 和 27 日 20 时 (图 8d)，北京站探空观测对流有效位能 (CAPE) 分别达 2 455.7 J·kg^{-1} 和 787.8 J·kg^{-1}，且垂直风切变较小，0℃ 层高度分别为 5 905 m 和 5 368 m，有利于深厚暖云层出现，为极端短时强降水的发生提供了有利条件。

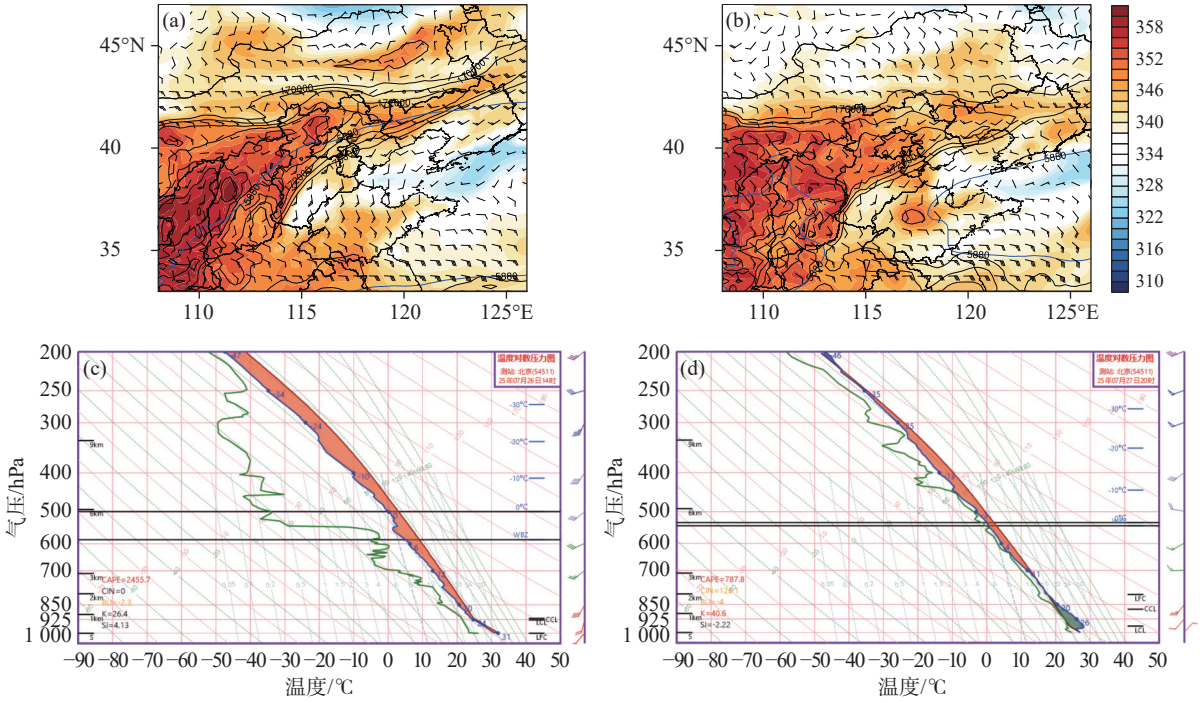


图 8 2025 年 7 月 26 日 14 时 (a, c) 和 27 日 20 时 (b, d) 850 hPa 假相当位温 (填色，单位：K) 和 1 000—500 hPa 总湿静力能 (黑色等值线，单位：KJ·kg^{-1}) 水平分布 (a,b；蓝色实线为 5 880 gpm 等位势高度线) 以及温度-对数压力图 (c, d)

Fig. 8 The (a, b) 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (shaded, unit: K) and 1 000–500 hPa total moist static energy (black contours, unit: KJ·kg^{-1}, blue line marks the 5 880 gpm contour), and the (c, d) *T*-ln*p* chart at (a, c) 14:00 BT on 26 July and (b, d) 20:00 BT on 27 July 2025

4.3 多台风接力水汽输送

华北极端强降水的水汽主要来源于我国东部海区、西北太平洋、南海及孟加拉湾 (陆婷婷和崔晓鹏, 2022)，台风远距离水汽输送在多次华北极端强降水事件中发挥关键作用。如前所述，此次过程期间，副高南侧伴有“范斯高”“竹节草”和“罗莎”等热带系统，台风远距离接力水汽输送对极端强降水的形成起到重要作用。

图 9 所示为整层可降水量、925 hPa 水汽通量及水汽辐合分布。过程期间，副高总体较为稳定，受台风“范斯高”“竹节草”“罗莎”西行北上影响，台风北侧和副高南侧之间形成一支强盛的偏东气流，该偏东

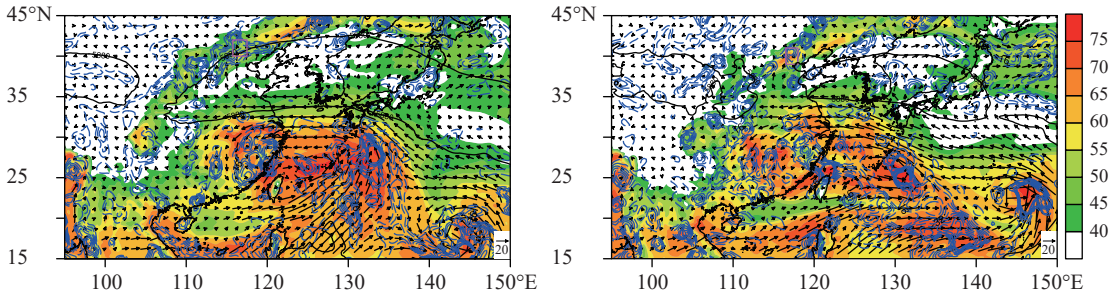


图 9 2025 年 7 月 26 日 14 时 (a) 和 27 日 20 时 (b) 925 hPa 水汽通量 (风矢量, 单位: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})、水汽通量散度 (蓝色等值线, 单位: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1},只显示负值区) 及整层可降水量 (阴影, 单位: mm) 水平分布 (黑色粗实线为 5 880 gpm 等位势高度线, 表征副高位置和范围)

Fig. 9 Horizontal distributions of 925 hPa moisture flux (wind vectors, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), moisture flux divergence (blue contours, unit: 10^{-9} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, only the negative value area is shown) , and precipitable water (shaded, unit: mm) at (a) 14:00 BT on 26 July and (b) 20:00 BT on 27 July 2025 (The bold black solid line denotes the 5 880 gpm contour, indicating the position and extent of the subtropical high)

气流进入黄淮南部一带, 沿着副高西部转为偏南气流, 持续向华北地区输送水汽。26 日 14 时 (图 9a), 副高西脊点西伸至 105°E 附近, “范斯高”“竹节草”尽管强度已经减弱, 但其北侧仍有显著水汽输送, 进入山东后转为偏南气流, 沿着副高底部继续向北输送, 并在副高北侧的河北北部及北京地区形成水汽辐合带, 北京地区整层可降水量达 55 mm。27 日 20 时 (图 9b), 西侧“竹节草”再度发展, 东侧台风“罗莎”北上, 二者北侧偏东气流打通, 形成水汽“接力”, 其北侧水汽通量显著增大, 表明水汽输送进一步增强, 与此同时, 副高西脊点东撤至山东半岛中部, 水汽沿着副高西侧持续北上, 受到地形阻挡, 在太行山东侧、燕山南侧形成西南—东北向辐合带, 其中, 北京东北部为辐合中心, 对应强降水区域, 整层可降水量进一步增至 65 mm, 为持续性强降水的出现提供了充沛的水汽条件。

进一步分析 26 日和 27 日主要降水时段的不同高度、不同方向水汽收支 (图 10)。26 日 (图 10a) 降水区南界整层均为水汽流入, 流入量在 (0.1~2.1)×10^{6} g·hPa^{-1}·s^{-1} 之间, 其中 875 hPa 处最强, 达 2.1×10^{6} g·hPa^{-1}·s^{-1}, 主要源于台风外围偏东转偏南气流的水汽输送 (图 9a), 西界 750 hPa 附近也存在水汽流入中心, 但强度略弱; 区域水汽净流入主要分布在 975—875 hPa 之间, 最大值位于 925 hPa 附近, 表明边界层内水汽输送是其主要水汽来源 (张芳华等, 2023)。27 日 (图 10b), 水汽仍主要以南界和西界为

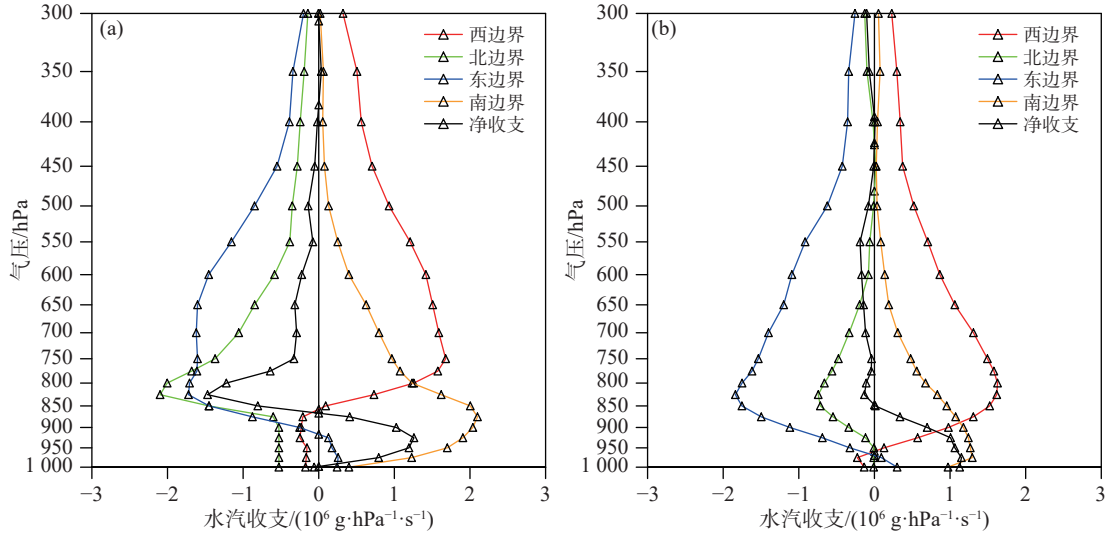


图 10 2025 年 7 月 26 日 17 时—27 日 02 时 (a) 和 27 日 14 时—28 日 08 时 (b) 强降水区域各边界水汽收支 (单位: 10^{6} g·hPa^{-1}·s^{-1}) 垂直分布[图 10a 分析区域为 (40.00°—42.00°N,115.75°—117.50°E), 图 10b 分析区域为 (39.00°—41.00°N,116.50°—118.00°E), 分别对应图 9a 和 b 洋红色方框处]

Fig. 10 Vertical distribution of moisture budget (unit: 10^{6} g·hPa^{-1}·s^{-1}) across the boundaries of the heavy rainfall regions during (a) 17:00 BT 26–02:00 BT 27 July and (b) 14:00 BT 27 July–08:00 BT 28 July (The analysis region for Fig.10a is 40.00°–42.00°N, 115.75°–117.50°E, and that for Fig.10b is 39.00°–41.00°N, 116.50°–118.00°E, corresponding to the magenta boxes in Fig. 9a and Fig. 9b, respectively)

主, 最大值在 975 hPa 高度, 量值为 1.3×10^6 g·hPa^{-1}·s^{-1}, 且区域净流入依然集中在 850 hPa 以下。整体而言, 台风外围偏东—偏南气流所造成的边界层水汽输入, 是此次特大暴雨得以维持的关键条件。

4.4 中尺度触发和维持机制

此阶段天气尺度强迫较弱, 中尺度作用成为决定其降水落区和强度的关键。过程期间, 伴有显著的 MCS 活动, 其中对流冷池出流及其与周围环境场形成的中尺度锋区, 对对流的触发和组织起到了十分重要的作用。基于逐小时地面自动站观测资料及雷达资料, 对其演变特征及成因作进一步分析。

26 日强降水时段主要集中在 26 日 20 时—27 日 02 时, 其中 26 日 22—23 时达到最强。分析表明: 18 时前后, 对流主体进入北京地区, 平原地区维持高温高湿状态, 暖湿中心假相当位温达 372 K。冷池与平原暖湿舌相互作用, 形成东北—西南向中尺度锋区, 锋区前部冷池出流与偏南气流辐合 (图 11a, 棕色圈所示), 为对流发展提供了有效抬升机制。20 时, 对流主体进入密云后相对稳定, 但其后部沿锋区不断触发出多个新生单体 (图 11b 中棕色色圆圈处)。22 时前后, 这些单体在朝东偏北方向移动过程中逐渐合并, 在怀柔西南部和密云西北部形成强回波中心 (≥50 dBz), 并在昌平北部持续有新生单体生成并向东北方向移动 (图 11c 和图 11d), 最终导致极端强降水的出现。随后, 随着对流主体北移, 冷池主体收缩, 平原暖湿舌减弱 (中心假相当位温降为 364 K), 中尺度锋区消失, 该时段降水逐渐减弱结束。

27 日强降水主要出现在 27 日 20 时—28 日 08 时, 最强时段为 28 日 04—05 时。分析表明: 27 日 22 时前后, 西部山前几乎同时生成多个东北—西南向排列的对流单体, 其中西南部最为强盛, 该单体冷池出流沿南侧暖湿舌不断触发新生对流, 并在西南气流引导下向东北移动, 影响北京密云、平谷及河北承德地区 (图 12a)。随着西南部单体增强, 其冷池逐渐扩大并向南延伸, 同时受西南方向持续移入单体的影响, 密云-平谷一带对流合并发展, 冷池愈发明显, 地面假相当位温场在北京中东部呈“Ω”型分布 (图 12b)。此后, 西南部冷池进一步扩展, 冷暖对峙减弱, 对流单体逐渐消散, 而东北部单体继续增强, 暖脊特征愈加突出 (图 12c)。随着东北部对流主体冷池的发展, 其后部与暖脊间冷暖对峙加剧, 再度形成中尺度锋区, 并在暖脊东侧触发新生对流向东北传播, 持续影响密云、平谷等地 (图 12d)。随后, 受 500 hPa 高空槽过境影响 (图略), 系统整体转向东南并逐渐减弱, 该阶段强降水过程结束。

综上, 26 日和 27 日的强降水过程均伴随明显的 MCS 活动, 但触发与维持机制有所不同。26 日主要受西部移入对流系统冷池出流与平原暖湿舌相互作用影响, 形成中尺度锋区并通过后向传播不断触发、合并新生单体, 导致极端强降水; 27 日则由西部山前

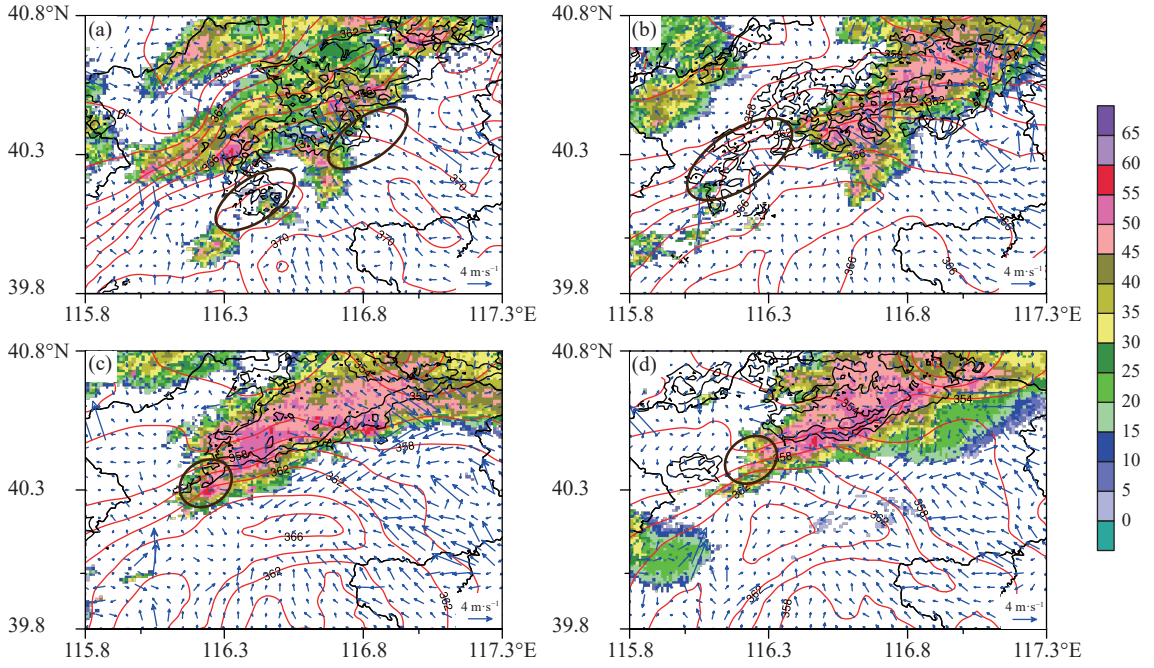


图 11 2025 年 7 月 26 日 18 时 (a)、20 时 (b)、22 时 (c)、23 时 (d) 地面风场 (风矢量)、假相当位温 (红色实线, 单位: K) 和雷达回波 (单位: dBz; 填色表示当前时次; 黑色等值线表示后 1 h 的 35、45、55 dBz) 叠加图

Fig. 11 Surface winds (wind vectors), pseudo-equivalent potential temperature (red contours, unit: K), and radar echoes (unit: dBz) at (a) 18:00 BT, (b) 20:00 BT, (c) 22:00 BT, and (d) 23:00 BT on 26 July 2025 (Radar echoes are shaded for the current time and shown as black contours of 35, 45, 55 dBz for the next hour)

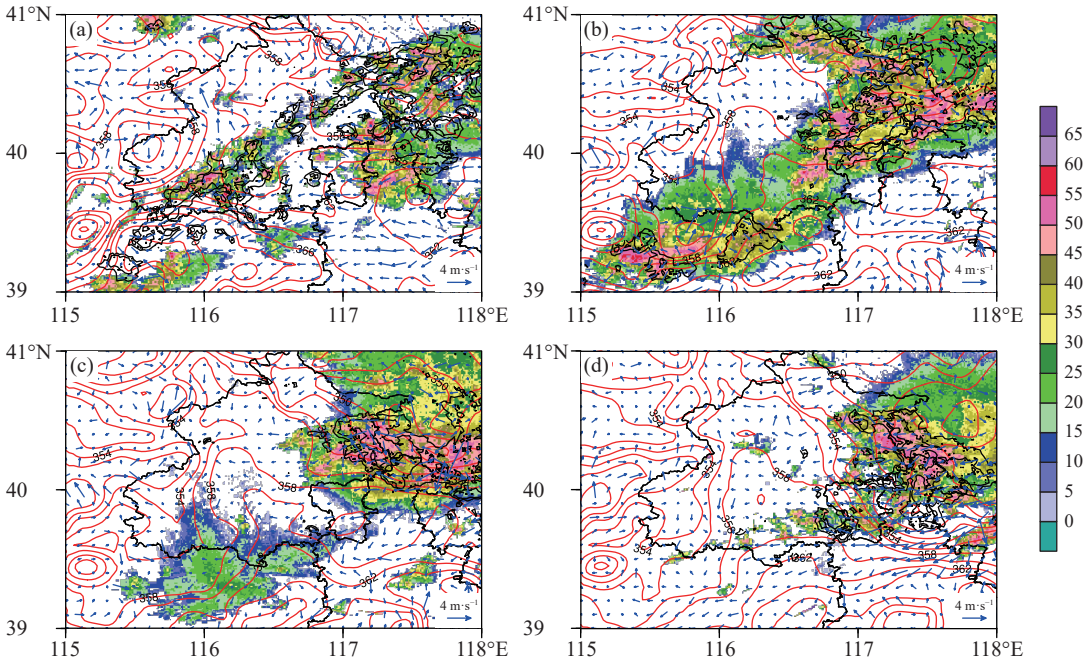


图 12 2025 年 7 月 27 日 22 时 (a)、28 日 02 时 (b)、04 时 (c)、06 时 (d) 时地面风场 (风矢量)、假相当位温 (红色实线, 单位: K) 和雷达回波 (单位: dBz; 填色表示当前时次; 黑色等值线表示后 1 h 的 35、45、55 dBz) 叠加图

Fig. 12 Surface winds (wind vectors), pseudo-equivalent potential temperature (red contours, unit: K) and radar echoes (unit: dBz) at (a) 22:00 BT on 27 July, and (b) 02:00 BT, (c) 04:00 BT, (d) 06:00 BT on 28 July 2025 (Radar echoes are shaded for the current time and shown as black contours of 35, 45, 55 dBz for the next hour)

触发的多个对流单体主导, 在冷池与暖脊交替作用下呈“Ω”型结构, 并伴随中尺度锋区多次重建和偏西南气流引导, 形成持续性降水带, 其降水持续时间更长。整体而言, 冷池-暖湿舌 (或暖脊) 作用及中尺度锋区维持是两次强降水的共同机制, 但 26 日以局地后向传播为主, 27 日则以东北—西南向排列多个对流单体先后通过降水中心伴随的“列车效应”为主, 部分阶段也伴有后向传播特征。

地形在强降水的形成中具有重要作用, 不仅会通过改变局地环流影响中尺度对流的组织和发展 (孙继松, 2005; 倪允琪等, 2006; Luo et al., 2017), 还会显著作用于雨滴增长、冰晶播撒等云内微物理过程 (Morales et al, 2018)。已有研究表明, 许多极端强降水事件均与复杂地形密切相关 (孙军等, 2012; 陈涛等, 2017; 高晓梅, 2023; 李晓兰等, 2025)。此次过程中, 无论累计降水量还是极端小时雨强, 均主要分布在太行山东麓和燕山南麓等复杂地形区 (图 2), 表明地形在此次极端强降水中同样发挥了重要作用。

由前述分析可知, 7 月 26 日和 27 日, 对流在进入山前区域均伴有显著增强特征, 这与特定环境场和局地地形的配置关系有关。7 月 26 日夜间对流单体在移入北京密云后, 显著加强并稳定维持, 形成大片 45 dBz 以上的强回波区 (图 11b—d), 这与密云特殊的“喇叭口”地形密切相关。结合前述对流演变 (图 11) 和北京周边区域地形及 7 月 26 日 20 时 925 hPa 水平风场、散度场分布 (图 13a) 可知, 该日对流显著发展增强区主要位于北京密云北部的“喇叭口”地形处, 进一步从环境风场与地形配置来看, 925 hPa 为一致偏南风, 山前平原区域风速普遍超过 8 m·s^{-1}, 接近山区风速逐渐减小, 偏南气流在山前形成多个辐合中心, 其中, 北京北部山前区域中心散度达−7.5×10^{-5} s^{-1}。这表明特殊的地形分布, 非常有利于水汽在山前特定区域聚集, 形成强的热力不稳定层结, 为对流的持续发展提供能量来源, 另一方面偏南气流沿“喇叭口”地形辐合抬升作用, 也在一定程度上加强了其垂直上升运动, 造成对流发展增强。7 月 27 日夜间, 对流最先源于西部山前 (图 12a), 后期移入密云-平谷一带对流合并发展 (12b—d), 同样与地形关系十分密切。结合前述对流演变 (图 12) 和北京周边区域地形及 27 日 22 时 925 hPa 水平风场、散度场分布 (图 13b) 可知, 该日对流最先源于北京西部山前区域, 其显著发展加强区主要位于燕山南侧密云、平谷等多个“喇叭口”地形处, 其偏南气流相较 26日 20 时略偏弱, 平原区域风速一般在 6 m·s^{-1} 左右, 在北京西部山前区域形成了一条辐合带, 为沿着西部山前生成多个对流单体提供了有利的触发条件, 当对流单体移入密云平谷后, 偏南气流沿特殊地形的辐合抬升作用, 则为对流的显著发展加强提供了有利的水汽辐合和动

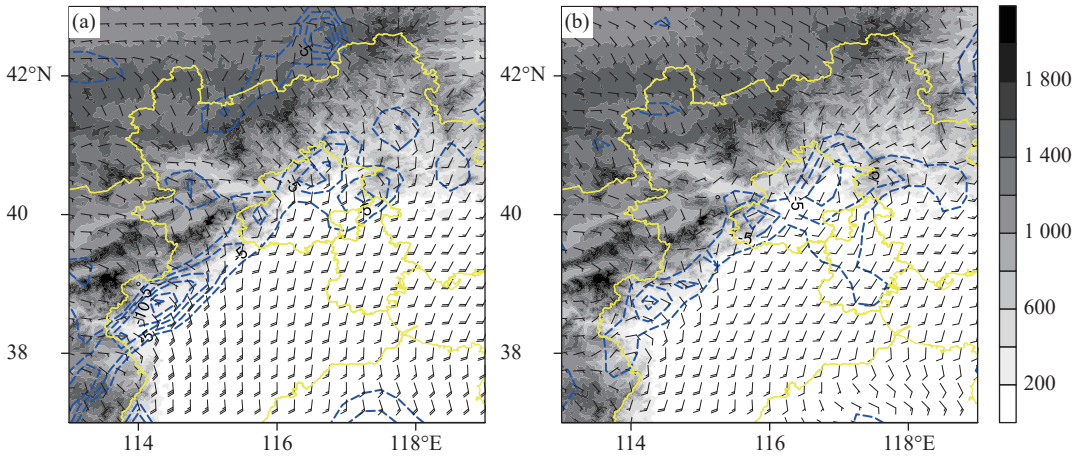


图 13 2025 年 7 月 26 日 20 时 (a) 和 27 日 22 时 (b) 925 hPa 风场 (风杆, 单位: m·s^{-1})、水平散度 (蓝色虚线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 与地形 (填色, 单位: m) 叠加图

Fig. 13 925 hPa wind field (wind barbs, unit: m·s^{-1}), horizontal divergence (blue dashed contours, unit: 10^{-5} s^{-1}), and topography (shaded, unit: m) at (a) 20:00 BT on 26 July and (b) 22:00 BT on 27 July 2025

力抬升条件。值得注意的是, 对流的组织和发展, 除了受地形影响外, 还受到多种因素的综合影响, 这也是图 13 中河北中部出现强辐合中心却无明显对流发展的原因。

5 结论和讨论

本文利用常规高空和地面观测以及 FY-4B 卫星红外云顶亮温 (TBB)、多普勒天气雷达、ERA5 再分析等资料, 对 2025 年 7 月 23—29 日华北特大暴雨过程进行了分析, 主要结论如下:

(1) 此次过程降水持续时间长, 降水强度和累计降水量大, 较常年同期显著偏多, 部分站点日降水量突破历史极值, 具有一定极端性; 强降水空间分布呈现“双雨带, 多中心”, 暖区暴雨特征突出。强降水过程可分为三个阶段, 分别为 23—25 日锋面暴雨与暖区暴雨共存的“双雨带”阶段, 26—27 日副高边缘弱天气系统强迫下的暖区暴雨阶段以及 28—29 日高空槽东移南下造成的锋面降水阶段。

(2) 在天气尺度背景上, 中高纬度存在平直锋区, 副高较常年同期偏北, 低纬有三个台风活动, 形成南北方向“三足鼎立”的稳定环流形势。华北北部处于北方大陆气团与副热带气团之间, 使得高温高湿能量在此聚集, 为极端强降水提供有利的热力条件; 台风外围远距离水汽接力输送造成的边界层水汽辐合, 是维持此次特大暴雨的关键因素。

(3) 26—27 日暖区强降水主要由多个 β 中尺度对流云团触发并相继发展的中尺度对流系统所致。后向传播与系统走向和移向高度一致, 导致“列车效应”, 是持续性短时强降水的重要机制。冷池-暖湿舌 (或暖脊) 相互作用及中尺度锋区维持, 对对流触发与再组织起到关键作用, 山前偏南气流的辐合作用进一步增强了对流发展, 导致强降水在山前累积。

此次特大暴雨是发生在稳定天气尺度背景下, 伴有“后向传播”、“列车效应”等显著的中尺度特征。低纬多台风连续活动造成的水汽与能量持续积聚, 是此次过程中长历时极端降水的重要背景。华北地区历次典型极端暴雨, 如“96·8”、“7·21”和“23·7”事件, 均与台风活动密切相关 (孙建华等, 2006; 徐洪雄等, 2014; 张芳华等, 2023; 唐永兰等, 2024)。因此, 低纬台风的水汽输送是短期时效华北极端强降水预报中不容忽视的关键因素。在高温高湿背景下, 暖区对流能否维持和增强决定极端降水是否发生。即便天气尺度强迫较弱, 中尺度过程叠加地形影响仍可触发局地强降水, 这也是第二阶段降水预报的难点。短临预报中应强化对暖区对流系统的监测, 当出现中尺度对流系统呈组织化发展的迹象时, 需及时提升预报预警等级并调整强降水落区。需指出的是, 极端强降水常涉及复杂的中尺度自组织与反馈过程, 不同机制之间存在微妙平衡, 上述复杂的非线性过程数值模式往往难以精确刻画, 短期预报难度较大。尽管天气背景和环境条件分析可一定程度辅助极端强降水的潜势预报, 但具体落区和强度仍难以把握。具体到此次过程, 河北、北京、内蒙古多地均出现超历史极值的降水, 针对其极端降水成因仍有很多科学问题有待进一步深入解释, 如, 不同尺度低空急流发生发展机制及对华北极端降水的作用如何? 不同极端强降水的中尺度对流组织方式及其环境场有何异同? 华北精细化地形与环境场配置对强降水落区和强度的影响如何? 等。深入探讨这些问题, 将有助于深化对华北极端强降水环境条件及发

生发展机制的认识, 并为精准预报预警提供理论与技术支撑。

参考文献 (References):

边清河,丁治英,吴明月,等.2005.华北地区台风暴雨的统计特征分析[J].气象,31(3):61−65. Bian Q H, Ding Z Y, Wu M Y, et al. 2005. Statistical analysis of typhoon heavy rainfall in North China [J]. Meteorological Monthly,31(3):61−65 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2005.3.014

陈涛,林建,张芳华,等.2017. “16·7”华北极端强降水过程对流尺度集合模拟试验不确定性分析[J].气象,43(5):513−527. Chen T, Lin J, Zhang F H, et al. 2017. Uncertainty analysis on the July 2016 extreme precipitation event in North China using convection-allowing ensemble simulation [J]. Meteorological Monthly,43(5):513−527 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.05.001

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]. Meteorological Monthly,38(10):1255−1266 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QXXX.0.2012−10−014

丁一汇.2015.论河南“75.8”特大暴雨的研究:回顾与评述[J].气象学报,73(3):411−424. Ding Y H. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975: Review and assenment [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(3):411−424(in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.067

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. A preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermal conditions of the "23.7" extreme rainstorm in North China [J]. Meteorological Monthly,49(12):1435−1450 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.112701

高晓梅, 任广治, 王向前, 等.2023. 2018 年山东一次极端暴雨的环境场特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(5):56−63. Gao X M, Ren G Z, Wang X Q, et al. 2023. Environmental characteristics of historical extreme rainstorm in Shandong Province caused by Typhoon Rumbia [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(5):56−63 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.05.007

黄士松.1986.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社:244. Huang S S. 1986. Heavy Rainfalls in the Pre-Flood Season in South China [M]. Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press:244 (in Chinese)

江吉喜,项续康.1997. “96·8”河北特大暴雨成因初探[J].气象,23(7):19−23. Jiang J X, Xiang X K. 1997. A primary study of the extreme rainfall event in early August 1996 over Hebei Province [J]. Meteorological Monthly,23(7):19−23 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.1997.7.004

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. Characteristics and formation mechanism of a warm-sector extreme rainstorm over Beijing on 16 July 2018 [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(1):1−17 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QXXB.0.2020−01−001

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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,49(3):629−644 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2403.23161

陆婷婷,崔晓鹏.2022.北京两次特大暴雨过程观测对比[J].大气科学,46(1):111−132. Lu T T, Cui X P. 2022. Observational comparison of two torrential rainfall events in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(1):111−132 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2104.21007

刘瑾, 王丛梅, 耿飞, 等.2020.2016 年 7 月华北特大暴雨过程河北南部垂直风切变观测特征[J].沙漠与绿洲气象,14(6):21−28. Liu J, Wang C, Geng F, et al. 2020. Vertical wind shear observational characteristics in South Hebei during the torrential rain process in North China in July 2016 [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(6):21−28 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2020.06.003

倪允琪,周秀骥,张人禾,等.2006.我国南方暴雨的试验与研究[J].应用气象学报,17(6):690−704 Ni Y Q, Zhou X J, Zhang R H, et al. 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in southern China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,17(6):690−704 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2006.06.007

寿绍文.2019.中国暴雨的天气学研究进展[J].暴雨灾害,38(5):450−463. Shou S W. 2019. Progress of synoptic studies for heavy rain in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):450−463 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:HBQX.0.2019−05−008

孙继松.2005.气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J].高原气象,24(1):62−69. Sun J S. 2005. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location [J]. Plateau Meteorology,24(1):62−69 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2005.01.010

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,31:218−225. 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 [J]. Torrential Rain and Disasters,31:218−225 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:HBQX.0.2012−03−003

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 Meteorologica Sinica,64(1):57−71 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2006.01.006

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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,37(3):705−718 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.12202

孙军,谌芸,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]. Meteorological Monthly,

38(10):1267−1277 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.013

孙崑.1990.京津冀地区盛夏暴雨的大尺度物理背景[J].气象,16(3):36−41. Sun L. 1990. Large-scale physical background of summer rainstorm in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Meteorological Monthly,16(3):36−41 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.1990.3.009

唐永兰,徐桂荣,唐国瑛,等.2024. “23.7”华北特大暴雨过程小时强降水时空分布特征[J].大气科学学报,47(5):778−788. Tang Y L, Xu G R, Tang G Y, et al. 2024. Temporal and spatial distribution characteristics of hourly heavy rainfall of the "23.7" heavy rainstorm event in North China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,47(5):778−788 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231022003

陶诗言.1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社. Tao S Y. 1980. Rainstorms in China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)

陶诗言,赵思雄,周晓平,等.2003.天气学和天气预报的研究进展[J].大气科学,27(4):17. Tao S Y, Zhao S X, Zhou X P, et al. 2003. Research progress in synoptic meteorology and weather forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,27(4):17 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2003.04.03

徐洪雄,徐祥德,张胜军,等.2014.台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应及其对北京“7·21”暴雨的影响[J].大气科学,38(3):537−550. Xu H X, Xu X D, Zhang S J, et al. 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(3):537−550 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.13173

徐祥德,齐冬梅,李跃清,等.2024.多尺度地形背景下东亚夏季风推进过程与我国洪涝和滑坡泥石流灾害时空特征[J].高原山地气象研究,44(4):1−10. Xu X D, Qi D M, Li Y Q, et al. 2024. Advancement process of east Asian summer, monsoon and the spatiotemporal characteristics of flood, landslide and debris flow disasters under multi-scale terrain in China [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(4):1−10. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.04.001

杨浩,吴翠红,彭涛,等.2025. 2023 年中国十大暴雨事件评选及过程简介[J].暴雨灾害,44(1):123−132. Yang H, Wu C H, Peng T, et al. 2025. Selection of top ten heavy rainstorm events over China in 2023 and process introduction [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):123−132 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−089

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

于超,贺靓,张恒德,等.2022.北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析[J].河海大学学报 (自然科学版),50(4):42−49. Yu C, He L, Zhang H D, et al. 2022. Characteristics and causes of the “7·16” extreme rainstorm in Beijing in 2018 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),50(4):42−49 (in Chinese). doi:10.3876/j.issn.1000−1980.2022.04.006

於琍, 徐影, 张永香.2018.近 25 a 中国暴雨及其引发的暴雨洪涝灾害影响的时空变化特征[J].暴雨灾害,37(1):67−72 Yu L, Xu Y, Zhang Y X. 2018. Temporal and spatial variation of rainstorms and the impact of flood disasters due to rainstorm in China in the past 25 years [J]. Torrential Rain and Disasters,37(1):67−72 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.01.009

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]. Meteorological Monthly,49(12):1421−1434 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.103003

张文龙,崔晓鹏.2012.近 50 a 华北暴雨研究主要进展[J].暴雨灾害,31(4):384−391. Zhang W L, Cui X P. 2012. Main progress of torrential rain researches in North China during the past 50 years [J]. Torrential Rain and Disasters,31(4):384−391 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2012.04.014

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2000.天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社. Zhu Q G,Lin J R,Shou S W,et al. 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

Hobbs P V, Wallace J M. 2006. Atmospheric Science: An Introductory Survey (2nd ed) [M]. New York:Academic Press: 504

Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al. 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,98(5):999−1013. doi:10.1175/BAMS−D−15−00235.1

Morales A, Morrison H, Posselt D J. 2018. Orographic precipitation response to microphysical parameter perturbations for idealized moist nearly neutral flow [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,75(6):1933−1953. doi:10.1175/JAS−D−17−0389.1

Xia R D, Ruan Y Q, Sun J S, et al. 2025. Distinct mechanisms governing two types of extreme hourly rainfall rates in the mountain foothills of North China during the passage of a typhoon remnant vortex from July 30 to August 1, 2023 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,42:761−779. doi:10.1007/s00376−024−4064−3

Zhang D L, Lin Y H, Zhao P, et al. 2013. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “Right results” but for wrong reasons [J]. Geophysical Research Letters,40(7):1426−1431. doi:10.1002/grl.50304

(责任编辑 唐永兰)