

# “25·7”华北暴雨的环流特征和水汽条件研究

姚秀萍<sup>\*1,2,3</sup> 黄逸飞<sup>4</sup> 马嘉理<sup>5</sup>

1. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081
2. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166
3. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081
4. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 武汉 430074
5. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

**摘要:** 基于地面气象站降水资料和 ERA5 再分析资料, 研究了 2025 年 7 月 23 日—30 日发生于华北地区的暴雨过程特征和水汽条件。结果表明, 本次华北暴雨过程属于典型的纬向环流型暴雨, 持续时间长达 7 天, 主要降水区东西横跨超 1000 km, 且存在两条主雨带, 分别位于华北高原地区(二级地形区)和平原地区(三级地形区), 降水时空特征与以往华北暴雨过程存在明显差异。本次暴雨过程存在异常的大尺度环流分布, 主体呈纬向分布且异常持续偏北的西太平洋副热带高压(副高)、停滞的西风带短波槽及在对流层低层出现的切变线是导致本次降水时空分布不同于以往典型华北暴雨过程的关键天气系统。南亚高压东伸和副高西进主导了暴雨过程的演变和降水的纬向分布格局。低纬度天气系统活跃, 我国近海连续出现的台风“范斯高”和“竹节草”与异常西进的副高接力输送水汽, 形成了两条水汽输送带和水汽辐合带, 分别维持二级地形区和三级地形区的两条主雨带。水汽收支分析得到, 本次暴雨过程水汽供应充沛, 异常西伸的副高导致水汽以西南向输送为主; 受副高进退影响, 水汽存在明显的跨地形区输送特征。

**关键词:** “25·7”华北暴雨, 环流演变, 水汽条件, 水汽收支

中图分类号: P44 文献标志码: A

## Research on the Characteristics of Circulation and Water Vapor Conditions of the July 2025 Rainstorm Event in North China

YAO Xiuping<sup>\*1,2,3</sup> HUANG Yifei<sup>4</sup> MA Jiali<sup>5</sup>

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Shenyang Institute of Atmosphere Environment, CMA, Shenyang 110166

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

\*项目资助: 国家自然科学基金面上项目(42275013), 东北冷涡研究重点开放实验室开放基金课题(2023SYIAEKFZD)。

作者简介: 姚秀萍, 教授, 主要从事暴雨等中尺度天气动力学研究。Email: [yaoxp@cma.gov.cn](mailto:yaoxp@cma.gov.cn)。

**Abstract:** Based on the surface precipitation data and the ERA5 reanalysis data, the rainstorm that occurred in North China from 23 to 30 July 2025 is investigated from the perspectives of circulation evolution and water vapor conditions. The findings reveal that the rainstorm was a across-warp type process, lasting for seven days, with the main precipitation area zonally spanning over 1,000 km. Two primary rain belts were identified, located in the North China Plateau region (secondary terrain area) and the plain region (tertiary terrain area), respectively. The anomalous large-scale circulation patterns were observed during this precipitation event. The abnormally persistent northward-shifting western Pacific subtropical high (WPSH), a stagnant westerly shortwave trough, and the shear lines generated in the lower troposphere were the key weather systems responsible for the distinct spatiotemporal distribution of precipitation compared to the past typical rainstorm events in North China. The eastward extension of the South Asian High and the westward movement of WPSH dominated the evolution of the rainstorm process and the zonal pattern of precipitation. The low-latitude weather system remained active, and the typhoons Francisco and Co-may, which emerged continuously near East China coastline, transported water vapor in a relay manner with the abnormally westward WPSH. Two water vapor transport belts and convergence zones were formed within the main precipitation area, feeding the two rain belts in the secondary and tertiary terrain regions. The water vapor budget analysis indicates that there was abundant water vapor supply during this rainstorm event, and the abnormally westward WPSH led to a southwestward transport of water vapor. Affected by the advance and retreat of the WPSH, water vapor exhibited obvious cross-topographic transport characteristics.

**Key words:** the July 2025 rainstorm in North China, circulation evolutions, water vapor condition, water vapor budget

## 引言

随着夏季风的向北推进,自7月下旬起,华北地区进入集中降水阶段。与我国南方地区的连阴雨不同,华北地区的集中降水经常表现为数次暴雨过程,总体呈现降水强度大、降雨时段集中、降雨局地性强等特点(《华北暴雨》编写组,1992; Luo et al, 2016; 罗亚丽等, 2020)。这些特点极易在华北地区造成严重的洪涝灾害,典型暴雨过程如1963年8月海河流域暴雨、1975年8月河南特大暴雨(章淹, 1990)、1996年8月华北地区特大暴雨(于玉斌和姚秀萍, 1999; 边清河等, 2006)、2012年7月北京暴雨(赵洋洋等, 2013; 赵大军和姚秀萍, 2017)、2016年7月华北地区暴雨(符娇兰等, 2017; 陈碧莹和闵锦忠, 2020)、2021年7月河南暴雨(姚秀萍和李若莹, 2023; Yao et al, 2024)、2023年7月华北地区暴雨(符娇兰等, 2023; 姚秀萍等, 2024)等,给当地造成了严重的人员伤亡和经济损失。作为我国首都所在地和北方最重要的经济区域,华北地区的暴雨灾害往往受到国内外的广泛关注,华

北暴雨的发生规律和演变机理等也是我国灾害天气研究的一个重点领域（孙继松，2025）。

基于以往华北暴雨过程，不少学者从多尺度天气系统相互作用、对流系统消亡机制以及复杂地形作用、水汽输送与辐合等角度开展了大量研究，取得了一系列进展（陶诗言等，1979；丁一汇等，1980；陶祖钰，1980；周鸣盛，1993；姚秀萍和于玉斌，1998；刘还珠等，2007；孙建华等，2005；孙继松等，2015）。陶诗言（1980）总结了华北暴雨的5类天气形势，它们本质上分别属于“北高南低”的纬向型和“西低东高”的经向型环流，其共同点在于大陆高压或西太平洋副热带高压（简称“副高”，下同）稳定维持在中纬度地区，使得西风带或热带低值系统移动减缓甚至停滞，偏南气流将水汽持续输送至华北地区，在大地形山前抬升产生大量降水（谌芸等，2012；丁一汇，2015；Zhong et al, 2015；符娇兰等，2023；陈涛等，2024；姚秀萍等，2024）。一些研究发现，如太行山等大地形山脉的动力和热力作用对暴雨的触发具有一定影响（黄荣等，2012；盛春岩等，2012），且山脉迎风侧低空气流的垂直切变也会调节降水的落区和增幅（孙继松，2005；Xia and Zhang, 2019），但地形对降水的具体作用随着大气动力条件变化而有所不同（章淹，1983）。此外，如城市（热岛）环流、地形环流和海陆风等局地环流也对暴雨的发展具有显著的贡献（孙继松等，2006；东高红等，2011；Yin et al, 2011；张文龙和崔晓鹏，2012）。

2025年7月下旬，在副高北上稳定维持、西太平洋台风频繁生成的背景下，华北地区遭遇了一次长时间、大范围的暴雨天气过程，北京、河北、天津北部等部分地区出现暴雨或大暴雨，局地出现特大暴雨；部分山区累计降水量超过500 mm，最大累计降水量超过600 mm（河北省易县）。值得注意的是，本次暴雨持续7天，在时间尺度上远超过去典型华北暴雨过程（如“23·7”暴雨过程持续4天，“16·7”暴雨过程持续2天，“96·8”暴雨过程持续3天）（胡欣和马瑞隽，1998；符娇兰等，2017；张芳华等，2023）；降水的空间分布也与以往典型华北暴雨过程有明显差异。因此，本文基于观测和高分辨率再分析资料，拟从影响降水时空特征的环流和水汽条件角度切入，探讨本次暴雨过程的环流特征和水汽条件，以期加深对本次暴雨过程的认识。

## 1. 资料与方法

### 1.1 资料

本文所用降水资料为中国气象局国家气象信息中心提供的中国地面气象站逐小时降水资料（2025年7月23日08时—30日08时，北京时，下同）。其他资料均来自欧洲中期天

气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）提供的第五代全球气候再分析产品（the fifth-generation atmospheric reanalysis dataset, ERA5），包括逐小时风场、比湿及位势高度。其中水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，垂直方向为 1000—100 hPa，共 27 层（Hersbach et al, 2020）。

## 1.2 方法

整层水汽通量（ $Q$ ，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）即水汽通量从底层到顶层的垂直积分，其计算公式为：

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} q \mathbf{V} dp \quad (1)$$

其中， $g$ 为重力加速度（单位： $\text{m s}^{-2}$ ）， $p_t$ 和 $p_b$ 分别为顶层和底层气压高度（单位： $\text{hPa}$ ），分别取 1000 hPa 和 300 hPa， $q$ 为比湿（单位： $\text{kg kg}^{-1}$ ）， $\mathbf{V}$ 为大气水平运动速度矢量（单位： $\text{m s}^{-1}$ ，Sun et al, 2011）。

基于研究区域边界的经纬度，通过以下计算公式可得区域各边界的水汽收支：

$$Q_E = \int_{\varphi_N}^{\varphi_S} R Q_{\lambda_E} d\varphi \quad (2)$$

$$Q_W = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} R Q_{\lambda_W} d\varphi \quad (3)$$

$$Q_S = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} R \cos \varphi_S Q_{\varphi_S} d\lambda \quad (4)$$

$$Q_N = \int_{\lambda_E}^{\lambda_W} R \cos \varphi_N Q_{\varphi_N} d\lambda \quad (5)$$

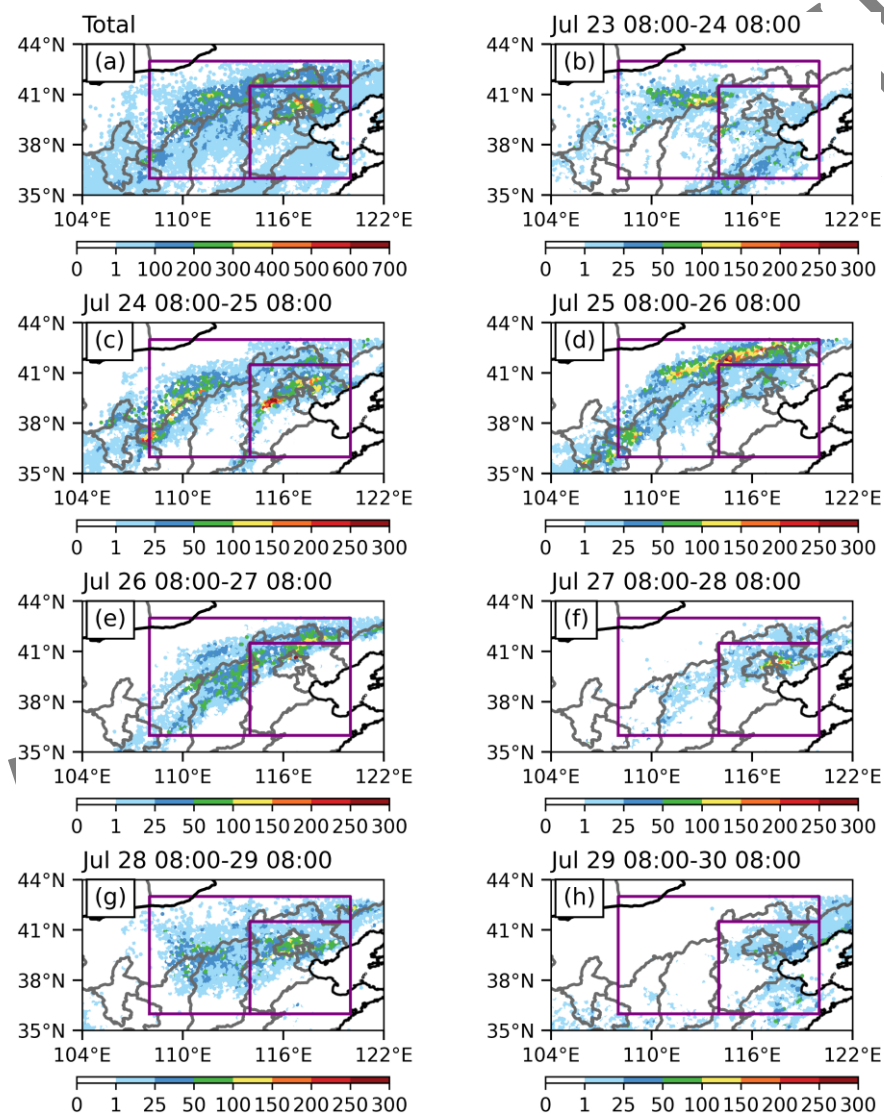
其中， $Q_E$ 、 $Q_W$ 、 $Q_S$ 和 $Q_N$ 分别为东、西、南、北边界的水汽收支（单位： $\text{kg s}^{-1}$ ），4 项的代数和为整个区域的水汽收支； $Q_{\lambda_E}$ 和 $Q_{\lambda_W}$ 分别为区域东、西边界上的纬向整层水汽通量， $Q_{\varphi_S}$ 和 $Q_{\varphi_N}$ 分别为区域南、北边界上的经向整层水汽通量； $\lambda_E$ 和 $\lambda_W$ 分别为区域最大和最小经度值， $\varphi_N$ 和 $\varphi_S$ 分别为区域最大和最小纬度值； $R$ 为地球平均半径，取 $6.37 \times 10^6 \text{m}$ （Sun et al, 2011）。

## 2. 结果

### 2.1 降水特征

本次暴雨过程自 7 月 23 日起，至 30 日结束，历时 7 天。相较于以往典型华北暴雨过程（如“16·7”和“23·7”等）的降水主要发生在太行山和燕山山前而言，本次降水的空间分布明显不同，主要降水区域（过程总降水量超过 100 mm 的地区）东西长度超 1000 km，包括陕西、山西和河北三省北部、内蒙古南部和北京全境，呈现纬向分布的特征（图 1a）。

逐日降水量分布情况显示，降水的空间分布存在明显的阶段性特征。在暴雨发生的首日，内蒙古南部和山东、河南北部分别存在一条纬向雨带，此外在太行山东麓存在一个降水中心(图 1b)；一天以后两条雨带均明显加强，且西侧雨带向西南移动至陕西北部，东侧雨带北进至河北中部及北京地区(图 1c)。自 25 日起，西侧雨带继续向西南移动并逐渐减弱消失，而东侧雨带继续增强，并翻越燕山进入内蒙古南部(图 1d)。26 日降水区域整体回到燕山南麓，降水中心位于北京北部。雨带虽然仍表现出明显的纬向分布，但强度相较前日已明显减弱(图 1e)。27 日降水区域明显缩小，主要集中在北京和河北东部，但 28 日降水范围又有所扩大(图 1f-g)。29 日起降水中心开始向东北地区移动，华北暴雨过程趋于结束(图 1h)。



注：紫色框分别为二级地形区和三级地形区，下同。

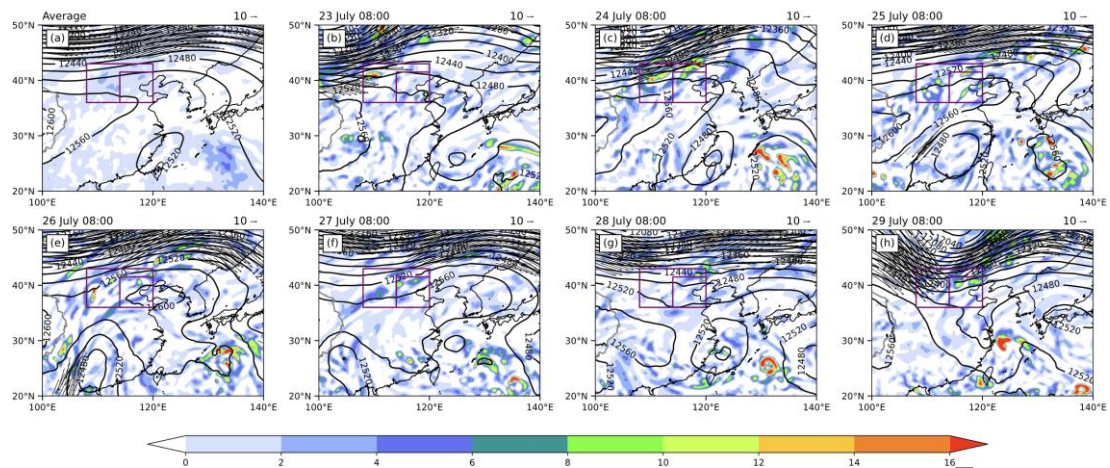
图 1 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程 (a) 总降水量和 (b~h) 逐日累计降水量的分布 (填色, 单位: mm)

Fig. 1 Distributions of the (a) total and (b-h) daily precipitation (colored, unit: mm) during the rainstorm process in North China from 23 to 30 July 2025

综上，本次降水持续时间长，降水区域呈近似纬向分布，雨带跨度较大，在持续时间和空间分布上与以往典型华北暴雨过程有明显区别，表现出近似江淮梅雨的特征。此外，本次暴雨过程中出现了两条纬向雨带的分布特征；根据华北地区的地形可以发现，这两条雨带分别位于海拔较高的黄土高原和海拔较低的华北平原地区，这也与以往华北地区典型暴雨过程的降水分布存在显著区别。基于雨带分布和华北地区地形特征，本文将主要降水区域分为西部二级地形降水区和东部三级地形降水区（分别简称“二级地形区”和“三级地形区”，图 1 紫色框），探讨降水分布和维持的成因。

## 2.2 环流演变及异常

图 2 给出了本次暴雨过程 200 hPa 高度的平均和逐日环流分布和演变过程。本次暴雨过程中，南亚高压位于青藏高原主体上空，西风急流位于 40°N 以北，主要降水区内存在明显的水平辐散（图 2a）。进一步分析逐日环流演变可以发现，在暴雨过程中，南亚高压完成了一次东伸西退过程。南亚高压外侧的 12560 gpm 等高线 23 日位于 110°E 附近，随后持续向东伸展，25 日覆盖了主要降水区域大部，并在之后的两天稳定在 130°E 以东，直至 28 日西退至 110°E 附近，并在 29 日退回青藏高原东侧边界。与此同时，西风急流也存在明显的变化。23 日主要降水区域位于西风急流出口区右侧，水平辐散较弱。24 日西风急流分为东西两支，主要降水区域此时位于东支急流入口区右侧，水平辐散明显增强，这也导致 24 日降水量迅速增加。25 日西风急流明显北移，而之后两天主要降水区域稳定在东支急流入口区右侧。28 日二级地形区和三级地形区分别位于西支急流出口区右侧和东支急流入口区右侧，导致三级地形区降水持续而二级地形区降水结束。29 日西风带波动加强，两支急流的更接近主要降水区域（图 2b-h）。综上，南亚高压和西风急流的活动使主要降水区域上空存在强烈的水平辐散，为降水的发展和维持提供了抽吸条件。



注：灰色实线为青藏高原边界，下同。

图 2 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程 200 hPa 高度 (a) 平均和 (b~h) 逐日水平散度 (填色)、位势高度 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (风场,  $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$ ) 的分布

Fig. 2 Distributions of the (a) average and (b-h) daily horizontal divergence (colored, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), geopotential height (contour, unit: gpm) and wind field (vector,  $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$ ) at 200 hPa during the rainstorm process in North China from 23 to 30 July 2025

500 hPa 高度的平均环流显示, 不同于“16·7”、“23·7”等华北暴雨过程中副高主体经向度较大的特征, 本次暴雨过程的副高呈纬向分布, 主体稳定维持在山东半岛至朝鲜半岛一线, 其外围反气旋环流控制了我国青藏高原以东的大范围地区; 西风带整体偏北, 二级地形区内存在一个短波低槽, 形成了“西低东高”的环流形势, 导致暴雨过程稳定持续; 主要降水区上空主要受西南气流影响, 因此降水的空间分布与前述的两次华北暴雨过程明显不同, 也导致水汽的输送将由台风和副高外围气流接力进行 (图 3a)。逐日环流演变表明, 与南亚高压的移动对应, 副高在暴雨过程中完成了一次西伸东退过程。其中, 副高在 23 日—25 日逐渐北抬西进, 其外侧反气旋环流控制我国大部分区域, 且中心逐渐稳定于朝鲜半岛; 随着副高的北抬西进, 二级地形区雨带和三级地形区雨带分别对应西移和北进; 台风“范斯高”随着副高的北抬逐渐靠近我国近海, 其与副高之间的偏东气流为降水区带来充足的水汽 (图 3b-d)。26 日台风“范斯高”减弱消亡, 但此时台风“竹节草”北上, 使副高继续稳定维持并继续为主要降水区输送水汽 (图 3e)。副高北侧纬向分布的正涡度带影响主要降水区域, 并且该正涡度带的强度变化与降水量变化高度一致, 表明其对降水的空间分布以及降水的演变具有显著影响。自 27 日起, 副高开始东退, 其西侧的西风槽随之东进; 槽后的西北气流自西向东影响二级和三级地形区, 降水逐渐减弱 (图 3f-g)。29 日副高完全退回海上, 对应

南亚高压主体回到青藏高原；西风带冷涡携带大量冷空气南下，华北暴雨过程最终结束（图 3f-h）。

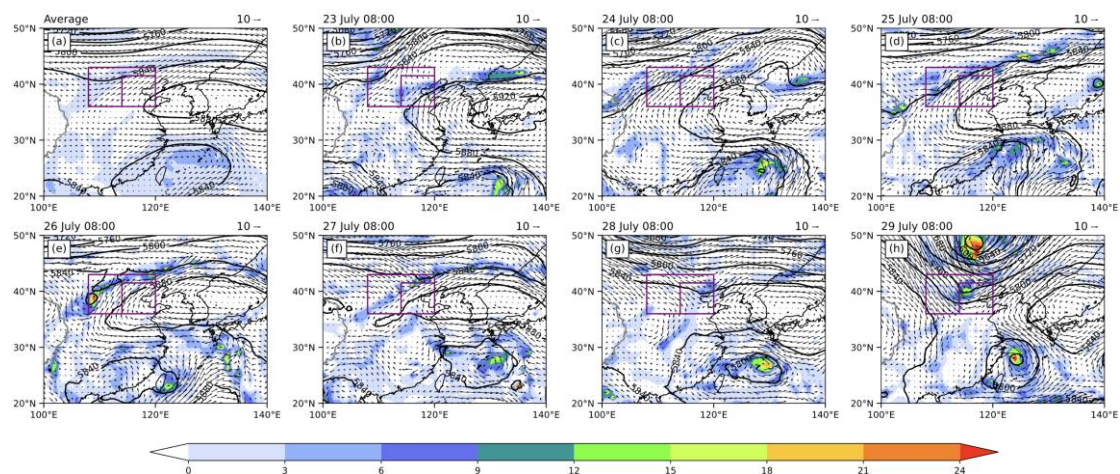
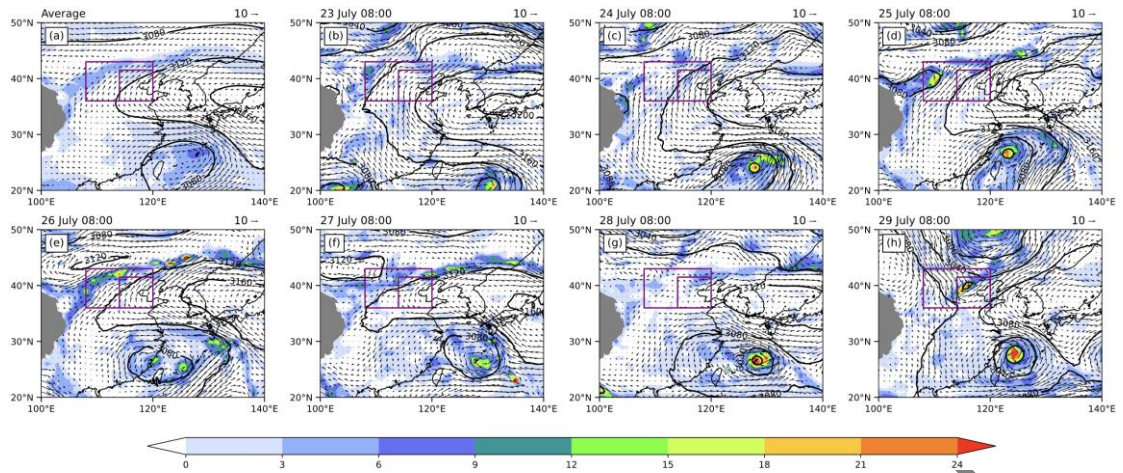


图 3 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程 500 hPa 高度 (a) 平均和 (b—h) 逐日垂直相对涡度 (填色)、位势高度 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (风矢<sup>1</sup>) 的分布

Fig. 3 Distributions of the (a) average and (b—h) daily vertical relative vorticity (colored), geopotential height (contour, unit: gpm) and wind field (vector) at 500 hPa during the rainstorm process in North China from 23 to 30

July 2025

图 4 展示了本次暴雨过程中, 700 hPa 高度的平均和逐日环流分布和演变。总体而言, 该高度的环流分布与演变和 500 hPa 大致相似, 但在影响主要降水区域的天气系统上存在明显区别。平均环流显示, 副高西北侧影响主要降水区域的正涡度带在 700hPa 上实际上是一条切变线 (图 4a), 但这条切变线并未伴随整个暴雨过程。在降水发生的前两天, 副高边缘由青藏高原东侧缓慢东退, 青藏高原北侧的偏西风 and 副高西北侧的西南风首先在二级地形区北部辐合并随副高缓慢东移, 致使降水首先发生在其影响的区域 (图 4b-c)。至 25 日, 青藏高原东北侧形成了一个狭长的低压区, 位于副高和我国西北上空的高压之间, 伴有强烈的带状正涡度区 (图 4d); 26 日西北高压东移, 高压南侧偏东气流与二级地形区上空的西南气流形成了一条暖式切变线 (图 4e); 然而 27 日, 随着西北高压增强, 其与副高之间的切变线风场发生了明显变化, 形成了以偏北与偏西气流的冷式切变线, 表明冷空气侵入二级地形区 (图 4f)。结合图 1f 可见, 此时二级地形区降水趋于结束。28—29 日的环流分布与 500 hPa 高度相似, 随着副高东退和西风带冷涡南下, 主要降水区域受到冷空气影响, 暴雨过程结束 (图 4g-h)。



注：灰色阴影为青藏高原。

图 4 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程 700 hPa 高度 (a) 平均和 (b~h) 逐日垂直相对涡度 (填色)、位势高度 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (风矢) 的分布

Fig. 4 Distributions of the (a) average and (b—h) daily vertical relative vorticity (colored), geopotential height (contour, unit: gpm) and wind field (vector) at 700 hPa during the rainstorm process in North China from 23 to 30

July 2025

与气候同期环流形势对比可见, 与“16·7”“23·7”等降水区域主要位于三级地形区的典型暴雨过程不同, 本次暴雨过程的环流异常表现为显著的纬向型分布特征 (图 5)。与“23·7”暴雨过程类似, 本次暴雨过程西风带显著偏北, 200 hPa 异常西风中心移至 50°N 附近。然而, 500 hPa 高度上, 30°N—50°N 之间存在显著的纬向异常高压区, 正位势高度异常值横跨超过 60 个经距, 范围已远超周璇等 (2020) 总结的纬向环流型暴雨过程的正位势高度异常; 结合先前的环流分析, 这表明副高与南亚高压的对向进退导致前者异常偏北且深入大陆, 且副高西侧的低值系统强度较弱, 冷空气活动较弱。30°N 以南我国东部至西太平洋受到明显的异常低压控制, 代表近海台风的作用, 其与副高之间对流层低层形成了显著的异常偏东风, 将西太平洋的水汽向主要降水区域输送, 为降水提供了充足的水汽条件。

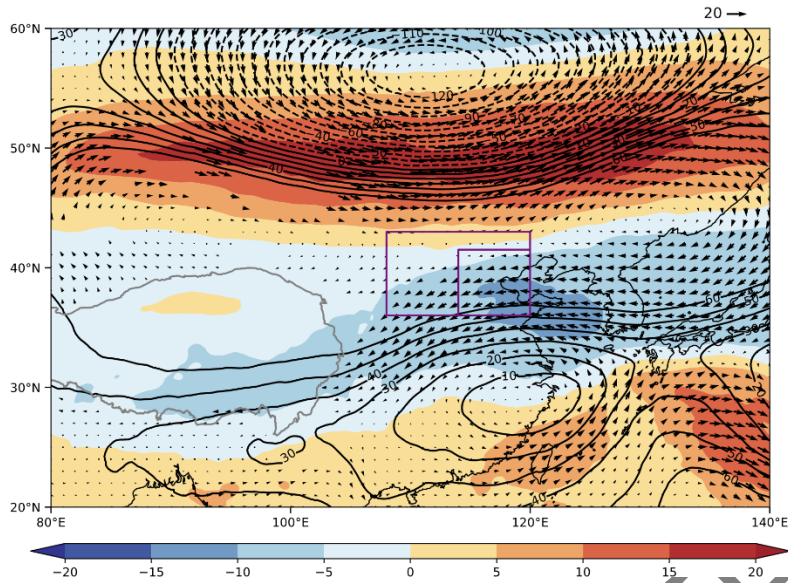


图 5 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程平均 200 hPa 纬向风（填色）、500 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm）和 850 hPa 风场（风矢）与气候（1995—2024 年）同期的异常分布

Fig. 5 Distributions of the anomalies of average zonal wind at 200 hPa (colored), geopotential height at 500 hPa (contour, unit: gpm), and wind field at 850 hPa (vector) during the rainstorm process in North China from 23 to 30 July 2025 relative to those of climatology (1995—2024)

## 2.3 水汽条件

### 2.3.1 水汽输送与辐合

图 6 展示了本次暴雨过程中水汽输送的演变特征。由于副高主体呈纬向分布且异常深入大陆，相较于“23·7”暴雨过程的双台风接力形成的东南水汽输送通道，本次暴雨过程的水汽由台风和副高接力形成的西南通道输送（图 6a）。在暴雨过程发生的前两天，副高西伸和其南侧台风“范斯高”逼近我国，形成了两条水汽输送通道：其中一条通道将水汽沿青藏高原东侧北上进入二级地形区，另一条通道将水汽经华东向北输送进入三级地形区，分别为两条雨带提供充足的水汽条件（图 6b-c）。结合先前的环流变化不难发现，西侧的水汽通道由副高外围的反气旋环流构建，输送距离远且强度较弱，离开二级地形区后继续向北进入西风带；东侧的水汽通道由副高边缘气流构建，输送距离近且明显更强，离开三级地形区后继续沿副高边缘进入日本海。相较于“96·8”、“23·7”等典型华北暴雨过程而言，本次暴雨过程的水汽通道范围更大且位置更偏西，导致降水量在空间上呈现与以往明显不同的纬向分布，而这种差异本质上是副高西伸及其外侧的大范围反气旋环流造成的。从 25 日起，西侧水汽输送带逐渐西移并减弱，对应二级地形区雨带西移减弱，而东侧水汽输送带继续维持（图 6d-e）。至 27 日，随着副高东退和台风“范斯高”减弱消亡，进入主要降水区的水汽

明显减弱（图 6f）。之后由于副高持续东退和西风带冷涡南下，即使台风“竹节草”已迫近我国近海，水汽也难以大量进入二级地形区，导致降水主要集中于三级地形区，直至暴雨过程结束（图 6g-h）。

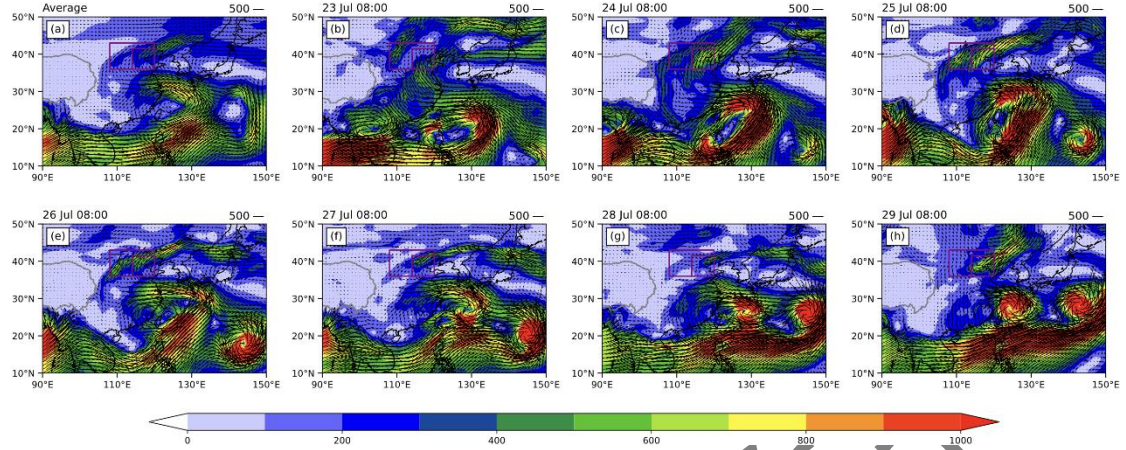


图 6 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程(a)平均和(b—h)逐日整层水汽通量(箭头和填色,单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 的分布

Fig.6 Distributions of the (a) average and (b—h) daily vertical integrated water vapor flux (vector and colored, unit:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) during the rainstorm process in North China from 23 to 30 July 2025

进一步分析整层水汽通量散度的演变发现,主要降水区内的水汽辐合与过程降水量分布一致,呈近似纬向分布(图 7a)。在降水发生的前两天,二级地形区和三级地形区分别存在一个水汽辐合中心,分别对应两条水汽输送通道,导致两条雨带出现(图 7b-c)。之后随着西侧水汽输送通道西移减弱,西侧水汽辐合中心强度逐渐减弱,东侧水汽辐合中心维持(图 7d-e)。副高东退之后,二级地形区首先出现了强烈的水汽辐散,导致二级地形区降水结束;三级地形区由于其北部燕山山脉阻挡,使得台风“竹节草”输送的水汽在山前辐合,从而产生降水(图 7f-g)。随着西风带冷涡南下,二级地形区水汽辐散进一步增强,并逐渐影响至三级地形区,暴雨过程结束(图 7h)。

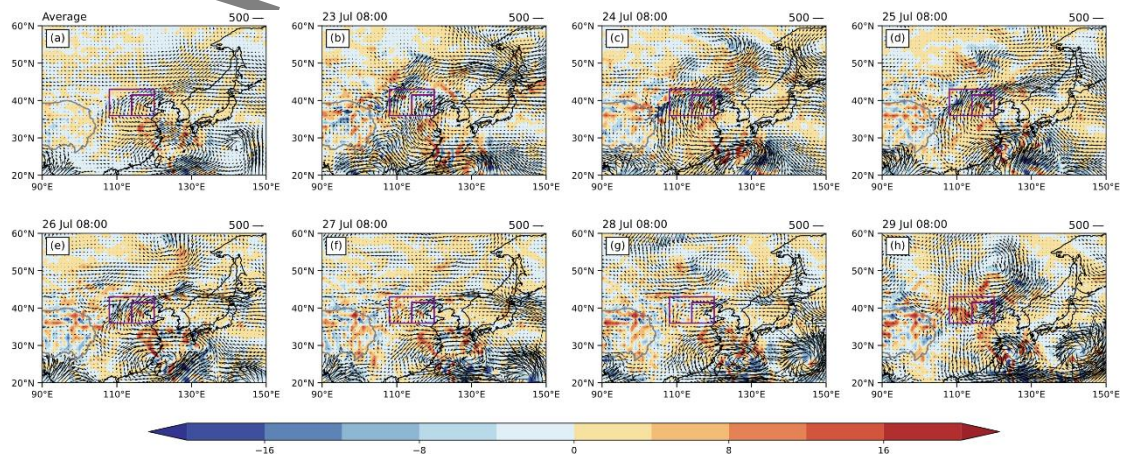


图 7 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程 (a) 平均和 (b~h) 逐日整层水汽通量 (箭头, 单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 及其散度 (填色, 单位:  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 的分布

Fig. 7 Distributions of the (a) average and (b~h) daily vertical integrated water vapor flux (vector, unit:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) and its horizontal divergence (unit:  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) during the rainstorm process in North China from 23 to 30 July

2025

### 2.3.2 水汽收支

图 8 分别给出了本次暴雨过程中, 二级地形区和三级地形区各边界的水汽收支及区域总水汽收支的演变特征。由于位于副高外侧西北边缘, 二级地形区的水汽主要从南边界进入, 在区域内作反气旋式偏转后主要由东边界流出。注意到西边界的水汽流入在 27 日前较强, 结合先前的环流和水汽输送分析可见, 这是由于副高显著西伸造成水汽输送通道西移, 本质上仍是来自我国近海的水汽, 而非西风带的水汽输入。西边界流入的水汽在 27 日后迅速减弱也对应了副高东退的过程。此外, 南边界流入了大量水汽, 最大水汽流入速度超过  $2.2 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$ , 表明本次暴雨过程存在充沛的水汽供应。然而, 二级地形区也存在强烈的水汽流出, 大部分水汽由东边界流出 (图 8a)。结合二级地形区和三级地形区的位置不难发现, 经二级地形区东边界流出的水汽大部分都进入了三级地形区的西边界, 而三级地形区南边界和西边界的水汽输入基本相当, 即三级地形区的降水由该区域南边界和二级地形区协同供应, 这导致三级地形区上空持续产生大量降水。三级地形区东边界主要为水汽流出, 这也导致本次降水在空间分布上并未出现以往华北典型暴雨过程沿太行山和燕山山前的“ $\Gamma$ ”型分布。三级地形区的水汽在 27 日前以南边界流入为主, 27 日之后南边界和西边界水汽流入速度相当。结合逐日降水量空间分布和环流形势可以发现, 27 日前三级地形区主要受副高边缘偏南气流影响, 雨带持续向北推进, 此时南边界水汽流入占主导地位; 27 日后随着副高东退, 副高外围西南气流影响三级地形区雨带, 因此西边界水汽流入贡献逐渐增加。此外, 三级地形区北边界流出的水汽也全部进入二级地形区的南边界, 对比二者的变化可以发现, 二级地形区南边界流入的水汽约有一半来自经三级地形区翻越燕山继续向北输送的水汽。总之, 本次暴雨过程中水汽存在显著的跨地形区输送, 导致降水呈现跨地形区的纬向分布。相较于二级地形区, 三级地形区最大水汽流入速度和总水汽收入量均更小, 但降水量远大于二级地形区, 可能与两个区域的地形差异有关: 由于燕山的阻挡, 西南向水汽在燕山山前辐合抬升, 促进了三级地形区的降水增长 (图 8b)。

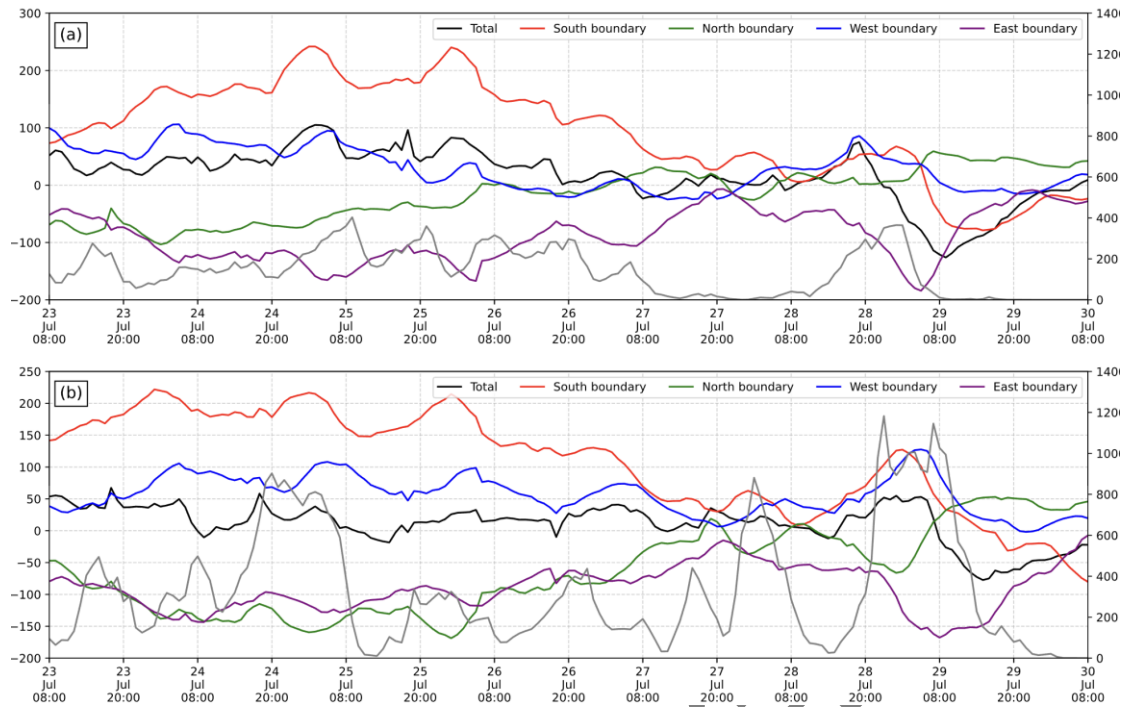


图 8 2025 年 7 月 23—30 日华北暴雨过程 (a) 二级地形区和 (b) 三级地形区各边界及区域总水汽收支的逐小时演变特征

Fig. 8 Hourly evolution characteristics of the total water vapor budget at the boundaries and regions over (a) the secondary and (b) tertiary terrain areas during the rainstorm process in North China from 23 to 30 July 2025

综上, 本文总结了本次暴雨演变过程中, 本次暴雨过程的天气系统和水汽输送的概念模型 (图 9)。本次暴雨过程的演变与南亚高压和副高的对向进退存在密切联系。南亚高压东移和副高异常西伸导致雨带呈现显著的纬向分布特征, 在中纬度对流层低层的切变线和近海台风的支持下, 西南向水汽通道分为两条, 分为维持二级和三级地形区的雨带 (图 9a)。随着南亚高压西移和副高东退, 暴雨过程明显减弱, 雨带回退至三级地形区, 主要位于燕山山前 (图 9b)。

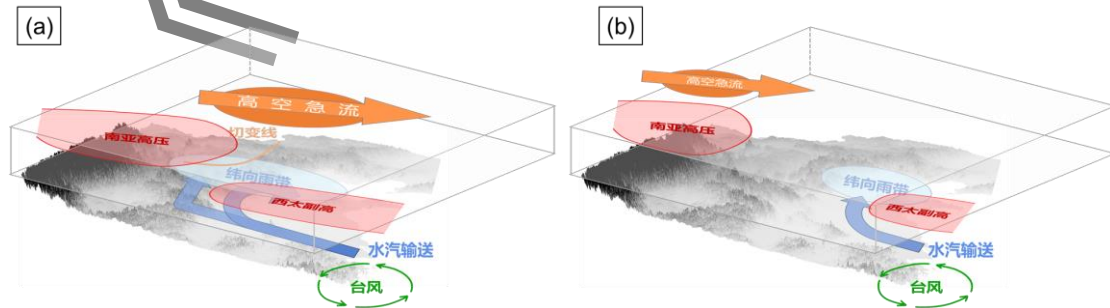


图 9 “25·7” 华北暴雨过程 (a) 发展和 (b) 减弱阶段的环流特征和水汽输送示意图

Fig. 9 Sketch maps of the circulations and water vapor transport during the (a) developing and (b) weakening stages of the July 2025 rainstorm event in North China

### 3. 结论与讨论

基于气象观测降水资料和 ERA5 再分析资料, 本文对 2025 年 7 月 23 日—30 日发生于华北地区的暴雨特征、环流演变和水汽条件进行了研究。主要结论如下:

(1) 本次暴雨过程属于典型的纬向环流型暴雨, 降水量时空分布不同于以往典型华北暴雨的降水分布。主要降水区呈纬向分布, 绵延超 1000 km, 持续时间长达 7 天, 表现出近似梅雨的特征。在暴雨过程中存在两条纬向雨带, 分别位于华北西部的黄土高原和内蒙古高原地区(二级地形区)以及华北东部的平原地区(三级地形区)。

(2) 本次暴雨过程存在异常的大尺度环流。呈纬向分布并持续异常偏北的副高主体、停滞的西风带短波低槽以及对流层低层出现的切变线是导致本次降水时空分布不同于以往典型华北暴雨过程的关键天气系统。南亚高压与副高对向进退主导了暴雨过程的演变, 导致降水呈现显著的纬向格局; 我国近海连续出现的台风“范斯高”和“竹节草”为降水提供了充沛的水汽。

(3) 本次暴雨过程的水汽条件充沛。我国近海台风和西伸的副高主体接力在主要降水区上空形成西南水汽输送带; 主要降水区内出现两条水汽输送带和水汽辐合带, 分别维持二级地形区和三级地形区的两条雨带; 受副高进退影响, 水汽存在明显的跨地形区输送特征。

本文初步分析了“25·7”华北暴雨的降水的时空分布、环流演变和水汽条件。未来可进一步从华北多尺度地形角度揭示本次暴雨过程两条雨带同时出现和后续合并的动力机制, 也可以从气候尺度探讨本次类似“梅雨”特征的华北暴雨的发生机理, 以及驱动暴雨过程中副高和南亚高压变动的机制。

#### 参考文献

- 边清河, 丁治英, 董金虎, 2006. “96·8”华北暴雨数值模拟与稳定性分析[J]. 气象, 32(8): 17-22. Bian Q H, Ding Z Y, Dong J H, 2006. Numerical simulation for “96.8” Huabei heavy rain and its stability analysis[J]. Meteor Mon, 32(8): 17-22 (in Chinese).
- 陈碧莹, 闵锦忠, 2020. 华北“7·19”暴雨中低涡系统演变及多尺度相互作用机制研究[J]. 热带气象学报, 36(1): 85-96. Chen B Y, Min J Z, 2020. A study on the evolution of vortex system and multi-scale interaction mechanism during the “7·19” rainstorm in north China[J]. J Trop Meteor, 36(1): 85-96 (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).
- 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)
- 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//中国科学院大气物理研究所集刊(第9号), 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社: 1-13. Ding Y H, Li J S, Sun S Q, et al, 1980. The analysis on mesoscale systems producing heavy rainfall in North China//Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy Sciences (No.9): The Researches on Heavy Rainfall and Severe Convective Weather. Beijing: Science Press: 1-13 (in Chinese) (查阅网上资料, 未找到本条文献, 请核对)
- 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 assessment[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 411-424 (in Chinese)
- 东高红, 何群英, 刘一玮, 等, 2011. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用[J]. 气象, 37(9): 1100-1107. Dong G H, He Q Y, Liu Y W, et al, 2011. The role of sea breeze front in local storm of Bohai Coast[J]. Meteor Mon, 37(9): 1100-1107 (in Chinese)
- 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等, 2017. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象, 43(5): 528-539. Fu J L, Ma X K, Chen T, et al, 2017. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China[J]. Meteor Mon, 43(5): 528-539 (in Chinese)
- 符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12): 1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 Severe Torrential Rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1435-1450 (in Chinese).
- 《华北暴雨》编写组, 1992. 华北暴雨[M]. 北京: 气象出版社: 182. Compilers of "Heavy Rainfall in North China", 1992. Heavy Rainfall in North China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 182 (in Chinese) (查阅网上资料, 未找到本条文献的英文信息, 请核对)
- 胡欣, 马瑞隽, 1998. 海河南系“96.8”特大暴雨的天气剖析[J]. 气象, 24(5): 8-13. Hu X, Ma R J, 1998. Synoptical Analysis of the Torrential Rain over the Southern Haihe River-basin during August 1998[J]. Meteor Mon, 24(5): 8-13 (in Chinese)
- 黄荣, 王迎春, 张文龙, 2012. 复杂地形下北京一次局地雷暴新生和增强机制初探[J]. 暴雨灾害, 31(3): 232-241. Huang R, Wang Y C, Zhang W L, 2012. Initiating and intensifying mechanism of a local thunderstorm over complex terrain of Beijing[J]. Torr Rain Dis, 31(3): 232-241 (in Chinese)
- 刘还珠, 王维国, 邵明轩, 等, 2007. 西太副高影响下北京区域性暴雨的个案分析[J]. 大气科学, 31(4): 727-734. Liu H Z, Wang W G, Shao M X, et al, 2007. A case study of the influence of the western pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing Area[J]. Chin J Atmos Sci, 31(4): 727-734 (in Chinese).
- 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等, 2020. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放40年研究成果[J]. 气象学报, 78(3): 419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 419-450 (in Chinese).
- 盛春岩, 高守亭, 史玉光, 2012. 地形对门头沟一次大暴雨动力作用的数值研究[J]. 气象学报, 70(1): 65-77. Sheng C Y, Gao S T, Shi Y G, 2012. Numerical simulation of the dynamic effect of the orography on a Mentougou severe torrential rain event[J]. Acta Meteor Sin, 70(1): 65-77 (in Chinese).
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等, 2005. 20世纪90年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 10(3): 492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Climatic Environ Res, 10(3): 451-492-506 (in Chinese)
- 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 Meteor, 24(1): 62-69 (in Chinese)
- 孙继松, 王华, 王令, 等, 2006. 城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学, 30(2): 221-234. Sun J S, Wang H, Wang L, et al, 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2): 221-234 (in Chinese).
- 孙继松, 雷蕾, 于波, 等, 2015. 近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 73(4): 609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al,

2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 73(4): 609-623 (in Chinese)
- 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, 丁一汇, 周晓平, 1979. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 3(3): 227-238. Tao S Y, Ding Y H, Zhou X P, 1979. The present status of the research on rainstorm and severe convective weathers in China[J]. Chin J Atmos Sci, 3(3): 227-238 (in Chinese)
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225. Tao S Y, 1980. The Torrential Rain in China[M]. Beijing: Science Press: 225 (in Chinese) (查阅网上资料, 未找到本条文献的英文信息, 请核对)
- 陶祖钰, 1980. 湿急流的结构及形成过程[J]. 气象学报, 38(4): 331-340. Tao Z Y, 1980. The structure and formation of the moist jet stream[J]. Acta Meteor Sin, 38(4): 331-340 (in Chinese)
- 姚秀萍, 于玉斌, 1998. “96.8”暴雨过程中不同尺度系统的相互作用[J]. 南京气象学院学报, 21(3): 432-439. Yao X P, Yu Y B, 1998. Interactions of different scale systems in the “96.8” torrential rain event[J]. J Nanjing Institute Meteor, 21(3): 432-439 (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).
- 姚秀萍, 黄逸飞, 包晓红, 等, 2024. “23·7”华北极端强降水特征和水汽条件研究[J]. 气象学报, 82(5): 585-599. Yao X P, Huang Y F, Bao X H, et al, 2024. Characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and its water vapor supply[J]. Acta Meteor Sin, 82(5): 585-599 (in Chinese).
- 于玉斌, 姚秀萍, 1999. 北上台风暴雨过程涡散场的能量收支和转换特征[J]. 气象学报, 57(4): 439-449. Yu Y B, Yao X P, 1999. Divergent and rotational wind kinetic energy budget and conversion during a torrential rain process caused by typhoon low pressure trough[J]. Acta Meteor Sin, 57(4): 439-449 (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)
- 张文龙, 崔晓鹏, 2012. 近 50a 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]. Torr Rain Dis, 31(4): 384-391 (in Chinese).
- 章淹, 1983. 地形对降水的作用[J]. 气象, 9(2): 9-13. Zhang Y, 1983. The effect of terrain on precipitation[J]. Meteor Mon, 9(2): 9-13 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献的英文信息, 请核对)
- 章淹, 1990. 高压“东阻”对特大暴雨形成的作用[J]. 气象学报, 48(4): 469-479. Zhang Y, 1990. Blocking effect of high pressure system on the formation of extra-intense heavy rain[J]. Acta Meteor Sin, 48(4): 469-479 (in Chinese).
- 赵大军, 姚秀萍, 2017. 北京“7·21”特大暴雨过程中的干侵入指数特征研究[J]. 暴雨灾害, 36(6): 527-534. Zhao D J, Yao X P, 2017. Characteristics of the Dry Intrusion Index in an extreme torrential rain event occurred on 21 July 2012 in Beijing[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 527-534 (in Chinese).
- 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等, 2013. 北京“7.21”特大暴雨环流形势极端性客观分析[J]. 气象学报, 71(5): 817-824. Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al, 2013. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 817-824 (in Chinese).
- 周鸣盛, 1993. 我国北方 50 次区域性特大暴雨的环流分析[J]. 气象, 19(7): 14-18. Zhou M S, 1993. The circulation analysis of regional heavy rainstorms in the North of China[J]. Meteor Mon, 19(7): 14-18 (in Chinese)
- 周璇, 孙继松, 张琳娜, 等, 2020. 华北地区持续性极端暴雨过程的分类特征[J]. 气象学报, 78(5): 761-777. Zhou X, Sun J S, Zhang L N, et al, 2020. Classification characteristics of continuous extreme rainfall events in North China[J]. Acta Meteor Sin, 78(5): 761-777 (in Chinese).
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. J Climate, 29(24): 8703-8719.

- Sun B, Zhu Y L, Wang H J, 2011. The recent interdecadal and interannual variation of water vapor transport over Eastern China[J]. Adv Atmos Sci, 28(5): 1039-1048.
- Xia R D, Zhang D L, 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19-20 July 2016 along the Taihang mountains in North China[J]. Mon Wea Rev, 147(11): 4199-4220.
- Yao X P, Li R Y, Bao X H, et al, 2024. Diagnosis of the Kinetic Energy of the "21·7" Extreme Torrential Rainfall Event in Henan Province, China[J]. Adv Atmos Sci, 41(1): 73-83.
- Yin S Q, Li W J, Chen D L, et al, 2011. Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing area and the possible effect of topography and urbanization[J]. Adv Atmos Sci, 28(4): 725-734.
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al, 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event[J]. J Geophys Res Atmos, 120(8): 3274-3291.

《气象学报》