杨晓亮,杨敏,金晓青,等.2024."23.7"河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,43(1):1-12. YANG Xiaoliang, YANG Min, JIN Xiaoqing, et al. 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):1-12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-191

"23.7"河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析

杨晓亮[1,2,3],杨敏[4],金晓青[3],孙云[3],梁天[3],谷欣蕊[3],闫雪瑾[3],张珊[3],张唯[5]
(1. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,雄安 071800;2. 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021;
3. 河北省气象台,石家庄 050021;4. 河北省气象行政技术服务中心,石家庄 050021;
5. 河北省沧州市气象局,沧州 061001)

摘 要: 2023年7月29日至8月2日,受台风"杜苏芮"北上减弱低压影响,河北出现罕见特大暴雨天气过程(以下简称"23.7"暴雨过程),其中位于冀南的邢台市梁家庄自动站52 h累积降水量高达1 003.4 mm。利用常规地面与探空资料以及区域自动站资料、雷达拼图与ERA5再分析资料等,对"23.7"暴雨过程的降水演变特征、环流形势与环境条件、中尺度特征进行了初步分析。结果表明: 此次暴雨过程具有持续时间长、累计雨量大、覆盖范围广等特征;台风"杜苏芮"登陆北上后,受500 hPa华北北部"高压坝"阻挡而停滞,河北大部地区整层水汽总量达到其气候平均态的2倍以上,环境大气具有低的抬升凝结高度和自由对流高度及一定的对流不稳定能量,以及850 hPa倒槽切变线稳定少动提供的持久辐合抬升条件,使得降水回波长时间维持在河北西南部太行山前和河北中部。边界层东南风急流伴随台风倒槽向北发展,急流核风速在河北中部超过22 m·s^{-1},大暴雨过程中地形作用明显。边界层急流影响河北西南部期间,回波强度30~40 dBz、质心高度低于6 km的多个对流单体先后移过梁家庄站上空,造成梁家庄站累计出现24 h的短时强降水;边界层急流北移后,8 m·s^{-1}左右的偏东风使太行山前层积混合云降水回波继续长时间维持造成雨区重叠,是梁家庄站52 h累积降水量超过1 000 mm的主要原因。

关键词: 特大暴雨;台风"杜苏芮";边界层急流;地形作用
中图法分类号: P458.1+21.1 **文献标志码**: A **DOI**: 10.12406/byzh.2023-191

Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023

YANG Xiaoliang[1,2,3], YANG Min[4], JIN Xiaoqing[3], SUN Yun[3], LIANG Tian[3], GU Xinrui[3], YAN Xuejin[3], ZHANG Shan[3], ZHANG Wei[5]

(1. *China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area* 071800; 2. *Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang* 050021; 3. *Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang* 050021; 4. *Hebei Provincial Meteorological Administrative & Technical Service Center, Shijiazhuang* 050021; 5. *Cangzhou Meteorological Office of Hebei Province, Cangzhou* 061001)

Abstract: Affected by the weakening of the low-pressure system caused by the northward movement of the typhoon "Doksuri", Hebei encountered an unprecedented severe torrential rain event (hereinafter referred to as "23.7" severe torrential rain) from 29 July to 2 August 2023, in which the accumulated rainfall in 52 hours is up to 1 003.4 mm at Liangjiazhuang station in Xingtai of southern Hebei. Using routine upper-air and surface weather observations, regional automatic weather station data, radar mosaic of reflectivity factor, ERA5 reanalysis data, and other relevant data, we conducted the analysis on the precipitation evolution characteristics, circulation patterns, environmental conditions, and mesoscale features of the "23.7" severe torrential rain. The results indicate that the "23.7" severe torrential rain is characterized by long duration, large accumulated rainfall and wide coverage. After landing and moving northward, Typhoon "Doksuri" is blocked by the high pressure barrier in northern North China at 500 hPa and stagnates. Total content of water vapor over most areas of Hebei reached more than twice the climate average state. All the factors, that low lifting condensation level, low free convection height, moderate convective

收稿日期: 2023-09-12;**定稿日期**:2023-11-19
资助项目: 河北省重点研发计划项目(21375404D);中国气象局雄安大气边界层立体监测和精细化模拟青年创新团队;河北省气象局灾害性天气机理研究创新团队
第一作者: 杨晓亮,主要从事灾害性天气预报技术与方法研究。E-mail: hbsqxt087@sina.com
通信作者: 杨敏,主要从事气象灾害防御及风险研究。E-mail: ym031167108927@163.com

instability energy, as well as the lasting convergence uplift provided by the stability and stagnation of inverted trough at 850 hPa, are the causes of maintaining precipitation echo for a long time in central Hebei and in the foothills of Taihang Mountains in southwestern Hebei. The southeasterly boundary layer jet moves northwards along with the typhoon inverted trough, and the jet core is located in central Hebei, with the wind speed exceeding 22 $m \cdot s^{-1}$ and terrain plays a significant role in the rainfall event. During the influence of boundary layer jet on southwestern Hebei, multiple convective cells with echo intensity of 30~40 dBz and centroid height lower than 6 km successively pass over the Liangjiazhuang station, causing a total of 24 hours of short-term severe rainfall at the station. After the boundary layer jet moving northwards, the rainfall overlapping, caused by the continued long-term maintenance of stratocumulus mixed cloud precipitation echo in the foothills of Taihang Mountains due to the interaction of easterly wind of about 8 $m \cdot s^{-1}$ and terrain, is the main reason of the 52-hour accumulated rainfall exceeding 1 000 mm at the Liangjiazhuang station.

Key words: severe torrential rain; typhoon "Doksuri"; boundary layer jet; topographical effect

引 言

2023年7月29日08时—8月2日08时(北京时,下同),受台风“杜苏芮”减弱低压北上影响,北京、河北等地遭遇了罕见特大暴雨天气。据水利部门统计,海河流域有8条大小河流发生了有实测水文资料以来最大洪水,其中大清河、永定河出现特大洪水,子牙河出现大洪水,海河流域发生自1963年以来最大流域性特大洪水。河北省在这次罕见特大暴雨天气过程(以下简称“23.7”暴雨过程)中,因持续强降雨引发特大洪水造成重大经济损失和人员伤亡。据不完全统计(截至2023年8月10日),全省110个县(市、区)388.86万人受灾,直接经济损失958.11亿元,因灾死亡29人、失联16人。

暴雨是华北地区夏季6—8月最主要的灾害性天气之一,如“63.8”海河流域大洪水、“96.8”河北大暴雨、“12.7”北京大暴雨、“16.7”华北特大暴雨和“21.7”河南极端暴雨,均给经济社会发展和人民生命财产造成重大损失。不少学者和气象科技工作者对华北暴雨进行了广泛而深入的研究,取得许多有价值的成果,其主要集中在以下三个方面: (1) 暴雨产生的天气背景及影响系统分析(孙建华等,2013;符娇兰等,2017;雷蕾等,2017;赵思雄等,2018;徐珺等,2022;齐道日娜等,2023);(2) 暴雨中尺度系统的结构分析、动力过程及数值模拟(俞小鼎,2012;孔期等,2022;Luo and Du,2023;Wei et al.,2023);(3) 典型极端降水个例分析(孙军等,2012;谌芸等,2012;苏爱芳等,2021;杨晓亮等,2021a;杨晓亮等,2022;苏爱芳等,2022;杨浩等,2022)。华北地区持续性大暴雨的发生往往都有来自低纬度的热带系统参与(丁一汇,2019;赵思雄和孙建华,2019),且地形对降水影响显著(Xia and Zhang,2019;汪小康等,2022)。游景炎(1965)分析“63.8”特大暴雨指出,几次强烈阵性暴雨与辐合中心、辐合线和切变线关系密切,其中东风切变线起了重要作用。孙建华等(2006)对河北“96.8”特大暴雨过程的研究表明,台风倒槽内的中尺度云团是其直接影响系统,太行山的阻挡作用导致强降水云团在石家庄附近长时间维持。孙继松等(2012)重点分析了“12.7”北京大暴雨的对流性降水阶段,认为“列车效应”与惯性重力波有关。赵思雄等(2018)指出,“7.20”华北特大暴雨过程中,高低层涡旋的相互耦合导致地面气旋发展,其中暖输送带的参与至关重要。苏爱芳等(2021)研究指出,郑州“7.20”极端暴雨过程中,东南风急流发展使得强降水回波停滞、合并,导致郑州短历时降水强度达到极端。杨晓亮等(2021b)在分析环渤海地区北上台风过程时指出,大暴雨落区与副热带高压、低空急流和地形关系密切,副热带高压明显偏西偏强,当其控制整个河北或形成北部高压坝时,大暴雨主要位于河北南部太行山前,南北走向的太行山对暴雨有增幅作用。

“23.7”暴雨过程具有维持时间长、累计雨量大、覆盖范围广等特点,造成洪涝灾害特别严重,及时对该过程进行回顾并展开研究非常必要。本文利用多源资料,对“23.7”暴雨过程的降水精细化演变特征、环境条件、中尺度特征和地形作用进行了初步分析,以期为今后此类罕见特大暴雨正确预报预警服务提供参考。

1 资料说明

本文分析所用资料包括: 常规地面与探空、区域自动站、多普勒天气雷达、风廓线雷达资料与欧洲中期数值预报中心第五代全球大气再分析资料(ERA5,0.25°×0.25°,时间分辨率1 h)。首先,使用逐小时区域自动站降水资料分析“23.7”暴雨过程的降水分布、演变及持续时长等特征;然后,使用ERA5资料分析该过程的环流形势与天气系统,并计算整层气柱水汽总量、水汽通量与水汽通量散度;最后,使用探空资料分析大气层结、对流能量,并采用多普勒天气雷达和风廓线雷达资料探讨该过程降水的中尺度特征。

另外,为检验ERA5再分析资料用于分析“23.7”暴雨过程的可靠性,表1给出2023年7月29日08时—8月2日08时京津冀地区不同高度探空观测与ERA5再分析资料的温度、风场、比湿等要素。对比结果显示,两种资料各要素值基本一致,说明ERA5资料可用于对该过程进行分析。

表1 2023年7月29日08时—8月2日08时京津冀地区探空观测与ERA5再分析资料对比

Table 1 Contrast between sounding observations and ERA5 reanalysis data in Beijing-Tianjin-Hebei region from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August 2023

高度/hPa	T/℃		u/(m·s^{-1})		v/(m·s^{-1})		q/(g·kg^{-1})	
	探空	ERA5	探空	ERA5	探空	ERA5	探空	ERA5
925	22.7	22.7	−5.0	−4.5	5.2	5.0	17.2	16.3
850	19.2	19.0	−4.8	−5.0	5.8	5.9	14.7	14.2
700	11.5	11.2	−2.4	−3.1	6.4	6.3	10.3	9.9
500	−2.5	−2.5	0.8	1.0	5.9	6.2	5.0	5.0
200	−48.4	−48.6	10.6	10.5	7.3	7.4	0.1	0.1

注：T为温度；u、v分别为纬向、经向风速；q为比湿。探空数据为河北张家口、唐山(乐亭)、邢台和北京4个探空站的平均值；ERA5为距离4个探空站最近格点数据的平均值

2 降水实况

2.1 降水演变特征

从“23.7”暴雨过程逐日降水演变看，河北西南部最先出现强降水，之后雨区自南向北发展。7月29日，河北中南部偏西地区普降暴雨(图1b)，河北西南部太行山山前出现大暴雨、局部特大暴雨；30日，强降雨区向北发展(图1c)，大暴雨区域达到最大，河北中部、北京西南部、河北西南部山前等地出现大范围大暴雨到特大暴雨，其中河北西南部山前连续2 d出现特大暴雨；31日，降雨区进一步北移，大暴雨主要集中在河北张家口东部、保定北部、廊坊和北京西部等地(图1d)，河北南部降雨明显减弱。从该过程累计雨量分布看(图1e)，北京西南部和河北中南部太行山前普遍在250～800 mm之间，250 mm以上的降水区超过6.5×10^4 km^2，超400 mm的站点沿太行山200 m地形等高线呈南北带状分布，主要集中在两个区域：一是位于河北中部的保定中北部和北京西南部等地；二是位于河北西南部太行山东麓的石家庄西部、邢台西部、邯郸西北部。最大过程累计雨量出现在邢台临城梁家庄站(图1a、e中“▲”所示)，为1 003.4 mm，其52 h累计降雨量接近河北省年平均降雨总量(505.6 mm)的2倍。因此，选择过程雨量超过100 mm最集中的区域(图1e

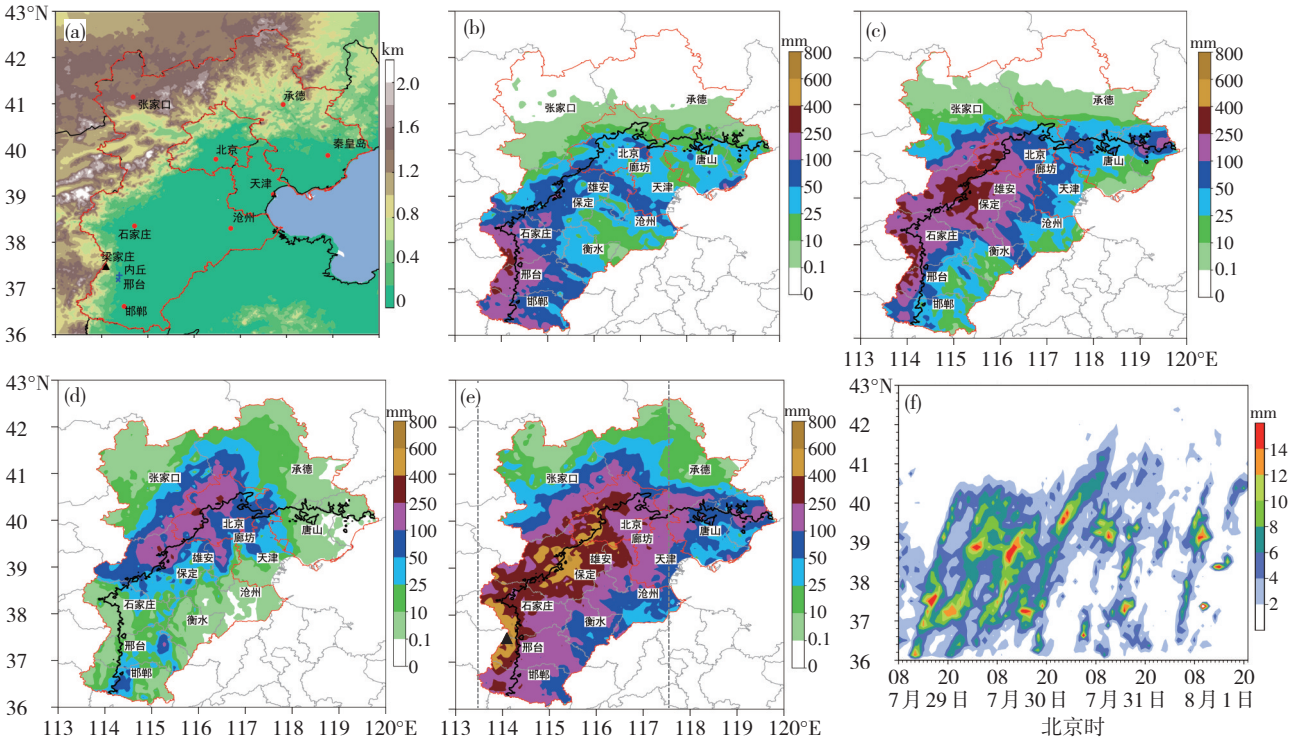


图1 河北省地形高度(填色区)及有关观测设备所在位置(a)，2023年7月30日08时(b)、31日08时(c)、8月1日08时(d)过去24 h累计雨量分布，7月29日08时—8月2日08时京津冀地区过程累计雨量分布(e)，以及沿图e中虚线所作的逐小时纬向平均降雨量变化图(f)

图a中，红色“●”为多普勒天气雷达，蓝色“+”为邢台内丘风廓线雷达，蓝色“×”为邢台探空站，“▲”为降水极值中心邢台梁家庄；图b-e中，黑色实线为200 m地形等高线，图e中“▲”同图a

Fig. 1 Topographical altitude (color-filled areas) and the location of observation instruments in Hebei Province. Prior-24 h accumulated rainfall at (b) 08:00 BT 30 and (c) 08:00 BT 31 July, and (d) 08:00 BT 1 August 2023. (e) Distribution of accumulated rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August 2023, and (f) the variation of meridional average hourly rainfall along the dashed line in Fig.1e. In Fig.1a, red symbols “●” mark Doppler weather radars, blue symbol “+” marks the wind profile radar at Neiqiu of Xingtai, blue symbol “×” marks the radiosonde station at Xingtai, and symbol “▲” marks Liangjiazhuang station in the center of maximum rainfall in Xingtai. In Fig.1b-e, the black solid line denotes the topographic contour line of 200 m, and in Fig.1e symbol “▲” represents the same as in Fig.1a

中虚线)绘制出纬向平均逐小时降雨量演变图(图1f),从中可看出降水区自南向北的发展过程,降水中心集中在南北两个纬度带:一是位于37°—38°N的雨带,主要出现在29—30日白天,对应图1e中河北西南部降雨中心;二是39°N附近的雨带,降水从29日夜间开始,一直持续到8月1日,持续时间比其南侧雨带长,对应河北中部强降雨中心。

2.2 雨强及持续时间

从“23.7”暴雨过程降雨强度分布看(图2a),各地最大小时雨量普遍在20~40 mm之间,整体降雨强度并不是很极端,北京南部、河北中部和西南部的部分站点超过50 mm,相比河北西南部地区,河北中部最大小时雨量超过50 mm的站点更多,但该过程最大小时雨量极值(110.9 mm)出现在河北西南部的邢台内丘獐么站。从该过程降雨总时长分布看(图2b),过程累计雨量大于100 mm站点中86%的站降雨总时长超过40 h,河北保定中部、承德西南部和北京南部降雨持续时间则超过60 h,其中保定易县富岗站降雨持续时间长达84 h,远超“16.7”华北极端强降水过程的48 h(符娇兰等,2017)。根据我国气象业务规范中所定义的小时降水量≥20 mm为短时强降水,“23.7”暴雨过程各站短时强降水维持时间普遍不长(见图2b中黑色等值线),超过5 h的区域主要位于北京、保定、雄安新区、廊坊南部和石家庄西部、邢台西部。梁家庄站降雨始于29日早晨,31日凌晨基本结束,总降水时长为52 h(图2c),低于河北中部许多站点,但其出现短时强降水的时间在京津冀地区最长,达24 h;该站最大小时雨量出现在29日23时,为48.1 mm。

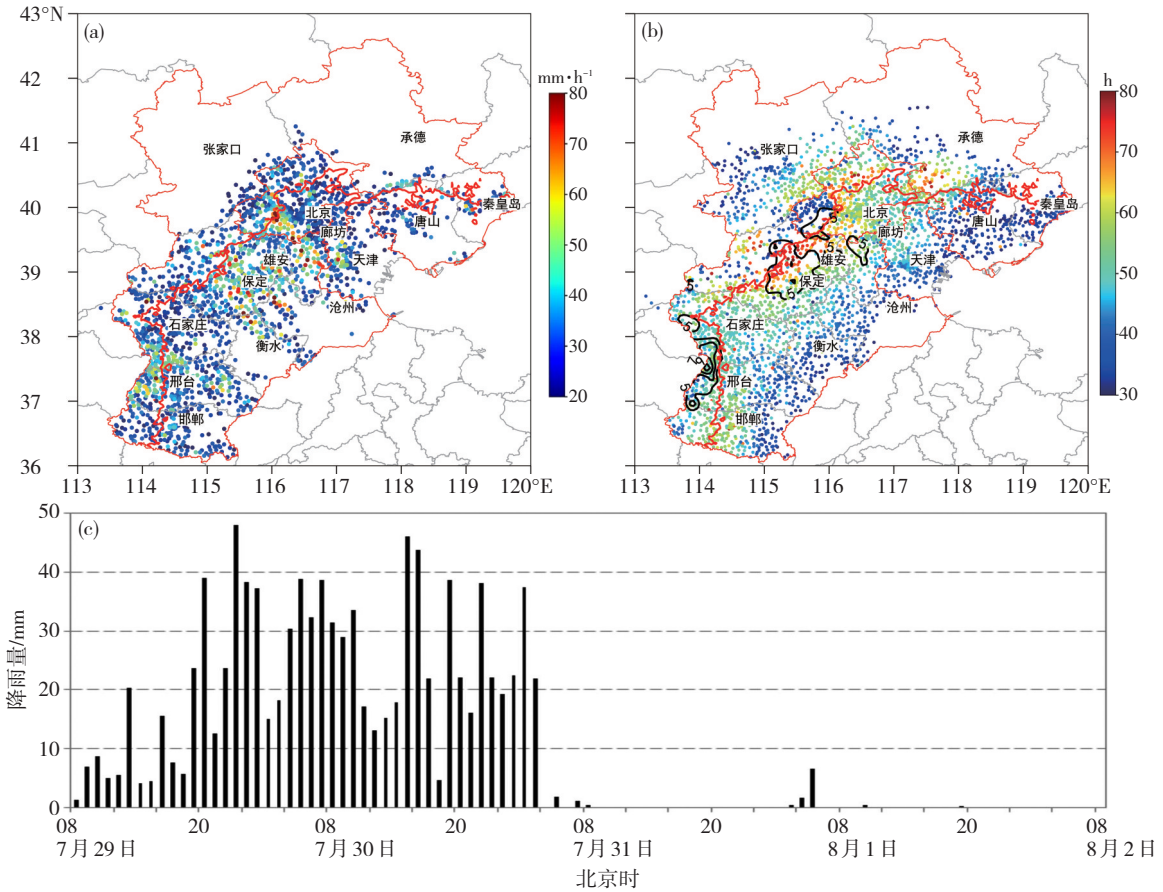


图2 2023年7月29日08时—8月2日08时京津冀地区最大小时雨量分布(a,单位:mm)、降雨总时长(彩色圆点)和短时强降水时长(黑色等值线)分布(b,单位:h)以及梁家庄站逐小时降水量变化(c,单位:mm)(图a、b中红色粗实线为200 m地形等高线)

Fig. 2 Distribution of (a) maximum hourly rainfall (unit: mm) and (b) the total duration (dots, unit: h) of rainfall and the duration (black contours, unit: h) of short-term severe rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and (c) the variation of hourly rainfall (unit: mm) at Liangjiazhuang station from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August 2023. In Fig. 2a-b, the red thick solid line denotes the topographic contour line of 200 m

综上可知,河北西南部地区降水整体较平稳,小时雨量并不极端,总降雨时间也不长,其累计雨量大的主要原因是短时强降水维持时间长。河北中部最大小时雨量普遍较河北西南部大,且持续时间普遍超过河北西南部地区,降水持续性特征明显,因此大部分站点累计雨量超过400 mm。

2.3 降水的极端性

“23.7”暴雨过程与以往该地区4次极端暴雨过程相比(表2),河北省平均雨量超过“96.8”“12.7”和“16.7”暴雨过程,但低于“63.8”暴雨过程;出现暴雨量

级以上降水的站点数超过“63.8”“96.8”“12.7”暴雨过程；过程雨量极值1 003.4 mm (29日08时—8月2日08时)次于“63.8”暴雨过程的2 051.0 mm；比较站点最大降雨时长，本次过程临城赵庄乡梁家庄站为52 h，而“63.8”暴雨过程内丘獐么站则长达7 d。本次暴雨过程，河北省和北京市共有14个国家气象观测站(下同)日降水量突破其有气象记录以来历史极值，同时有26站3 d累计降水量突破其历史极值；河北省79站过程累计降水量超过本站常年7月降水量均值，16站过程累计降水量超过本站常年夏季(6—8月)降水量均值。

表2 华北地区5次典型大暴雨过程实况

Table 2 Data of the five typical torrential rain events in North China

暴雨过程	起止日期(年·月·日)	河北省平均雨量/mm	单站最大雨量		小时最大雨量/mm
			量值/mm	位置(经纬度)	
“63·8”	1963·8·1—10	321.4	2051*	邢台内丘獐么站(114.21°E，37.35°N)	104.3
“96·8”	1996·8·3—6	132.8	670*	石家庄井陉微水站(114.14°E，38.03°N)	80.1
“12·7”	2012·7·21—22	50.6	541.0	北京房山河北镇(115.92°E，39.8°N)	112.0**
“16·7”	2016·7·19—21	152.9	816.5**	石家庄赞皇嶂石岩乡(114.09°E，37.49°N)	102.8**
“23·7”	2023·7·29—8·2	176.3	1003.4**	邢台临城梁家庄站(114.09°E，37.48°N)	110.9**

注：“*”为水文站观测数据；“**”为区域气象站观测数据；其他为国家气象站观测数据

综上可知，“23.7”暴雨过程具有持续时间长、累计雨量大、覆盖范围广等特征，累计雨量、单站极值雨量超过华北地区以往“96.8”“16.7”“12.7”极端暴雨过程，次于“63.8”暴雨过程；该过程累积雨量400 mm以上的区域覆盖河北中部以及河北西南部太行山山前地区；强降水自南向北发展，过程累计雨量超100 mm站点的降雨时长普遍超过40 h，降水维持时间和最大小时雨量河北中部站点普遍大于河北西南部地区，但短时强降水时长则是河北西南部太行山山前超过河北中部。

3 环流形势与环境条件

3.1 环流形势

2023年7月29日—8月1日，500 hPa中高纬地区冷空气活动位置偏北，河北主要受来自低纬度热带和副热带天气系统影响。29日08时(图3a)，西太平洋副热带高压(以下简称副高)呈块状，其位置明显偏北偏

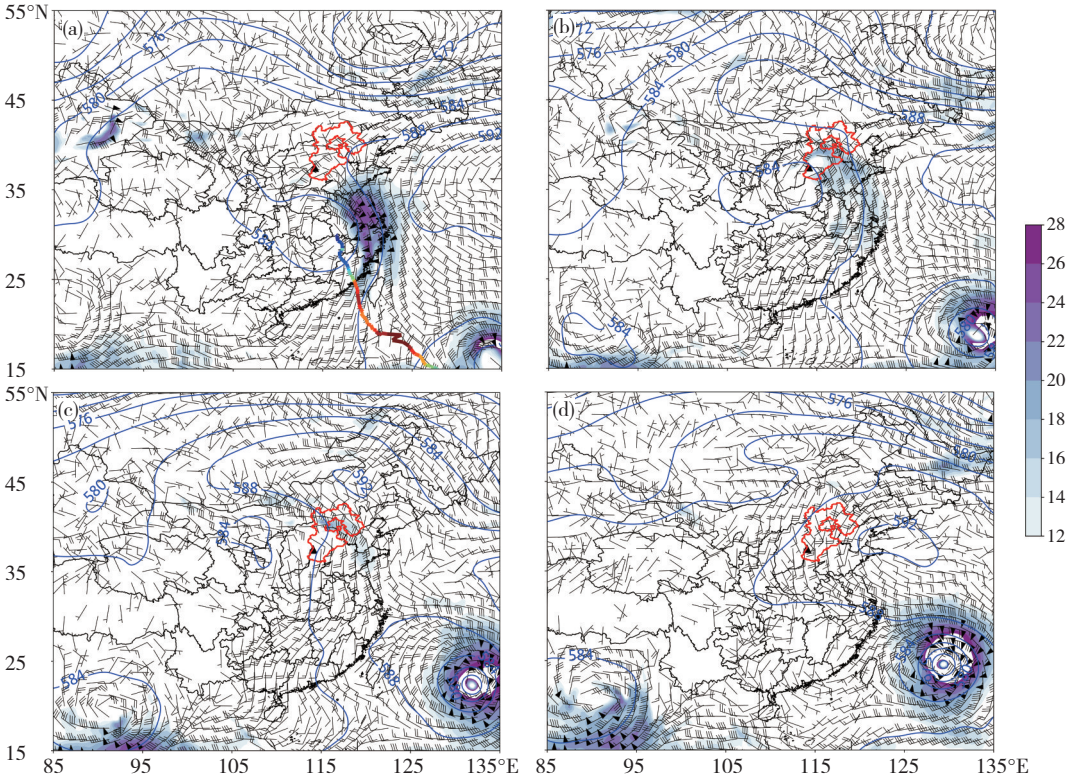


图3 2023年7月29日(a)、30日(b)、31日(c)与8月1日(d) 08时500 hPa位势高度(等值线，单位：dagpm)与850 hPa风场(风向杆，单位：m·s^{-1})填色区为≥12 m·s^{-1}的低空急流，“▲”表示梁家庄站；图a中彩色线条为台风“杜苏芮”移动路径

Fig. 3 Geopotential height field (contour, unit: dagpm) at 500 hPa and horizontal wind field (wind bar, unit: m·s^{-1}) at 850 hPa at (a) 08:00 BT 29,(b) 08:00 BT 30 and 08:00 BT 31 July, and (d) 08:00 BT 1 August 2023. Color-filled areas show the low-level jet of wind speed greater than or equal to 12 m·s^{-1}, and symbol “▲” marks Liangjiazhuang station. In Fig.1a, the colored line denotes the moving path of Typhoon "Doksuri"

西。第5号台风“杜苏芮”7月28日在福建沿海登陆后沿副高西侧偏南气流一路北上(图3a中彩色线条),台风减弱低压进入安徽境内时其东侧与副高之间形成一支强盛东南风低空急流,急流中心风速超过24 m·s^{-1},将东南沿海暖湿空气源源不断向华北输送,此时冀鲁交界附近已形成东南风与东北风的倒槽切变线,地面雨区在倒槽附近形成后自东向西移至河北南部。30日08时(图3b),副高已与蒙古高压脊打通,在河北北部形成准东西向高压坝,阻挡了台风低压继续北上,此时台风减弱低压中心位于河南,其北侧倒槽切变线伸向河北中南部地区,切变线东侧为风速16~18 m·s^{-1}的东南风低空急流,降水主要位于倒槽切变线附近。31日08时(图3c),高压坝进一步加强,副高588 dagpm线西界已抵达115°E以西,台风低压迅速减弱,850 hPa河北中部到北京一带存在东西向暖式切变线,北京附近东南风急流仍维持在18 m·s^{-1},但急流水平尺度已减小,之后降水区主要位于河北中部偏北地区和北京西部(图1d)。8月1日08时(图3d),副高588 dagpm线控制华北大部分地区,台风低压和低空急流随之消失,850 hPa转为偏南风,河北地面以分散性雷阵雨为主,降雨强度和范围明显减弱(小)。

综上可知,第5号台风“杜苏芮”登陆北上带来大量暖湿空气,副高与蒙古高压脊打通形成“高压坝”使天气形势维持稳定,阻挡了“杜苏芮”进一步北上,以及850 hPa低空急流和倒槽切变线在河北长时间维持创造了较好的辐合抬升条件,并形成非常有利于华北出现持续性大暴雨的天气形势。从该过程环流形势和逐日降水量看,台风倒槽影响河北的主要时段是7月30日,该时段河北大多数台站降水都是最强的(图1c),因此下文重点探讨此时段强降水的发生原因。

3.2 环境条件

3.2.1 不稳定条件

从位于河北南部的邢台站(位置见图1a)7月29—30日不同时次探空图上可见(图4a—d),7月30日20时之前,整层大气都接近饱和,对流有效位能(CAPE)在380~1 079 J·kg^{-1}之间,说明环境大气存在一定的不稳定能量;地面露点温度维持在24~26 ℃之间(图略),具备产生短时强降水的水汽条件(苏爱芳,2021)。由于边界层水汽趋于饱和,抬升凝结高度(LCL)、自由对流高度(LFC)均很低,即在近地层,这使得层云云底低、环境蒸发弱,只要有弱的辐合抬升,气块就能沿湿绝热线上升进而成云致雨,并在CAPE的加持下发展加强。由于对流层中下部均为东南风或西南风,因此0—6 km垂直风切变较弱,始终维持在11 m·s^{-1}以下,弱

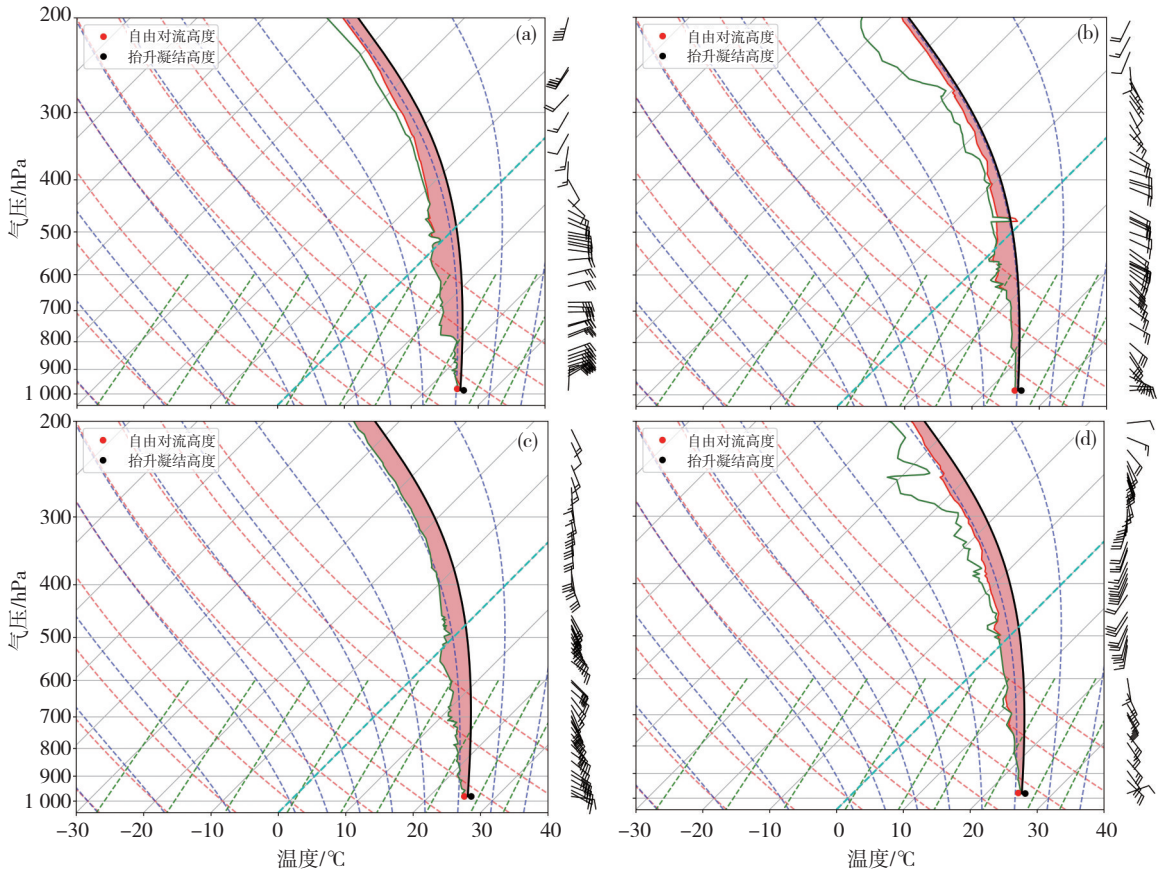


图4 2023年7月29日20时(a)与30日08时(b)、14时(c)、20时(d)河北邢台站探空图

Fig. 4 Sounding chart at Xingtai station in Hebei at (a) 20:00 BT 29, and (b) 08:00 BT, (c) 14:00 BT and (d) 20:00 BT 30 July 2023

垂直风切变有利于增强降水效率(孙继松，2017)。31日之后，随着河北南部降水停止，850 hPa以上温度露点差开始增大(图略)，但近地层大气仍维持水汽饱和状态。

综上可见，台风倒槽影响该过程强降水期间，河北中南部环境条件为深厚的湿层、低的LCL和LFC、弱的0—6 km风垂直切变，这些条件有利于出现强降水，一定的CAPE为强降水的发生提供了较好的能量条件。

3.2.2　水汽条件

充沛的水汽是产生持续性强降水的必要条件。随着台风"杜苏芮"减弱低压及其外围气流的北上，京津冀地区整层气柱水汽总量(TCWV)明显增加。7月29日20时(图5a)，河北东南部TCWV增大到70 kg·m^{-2}，相

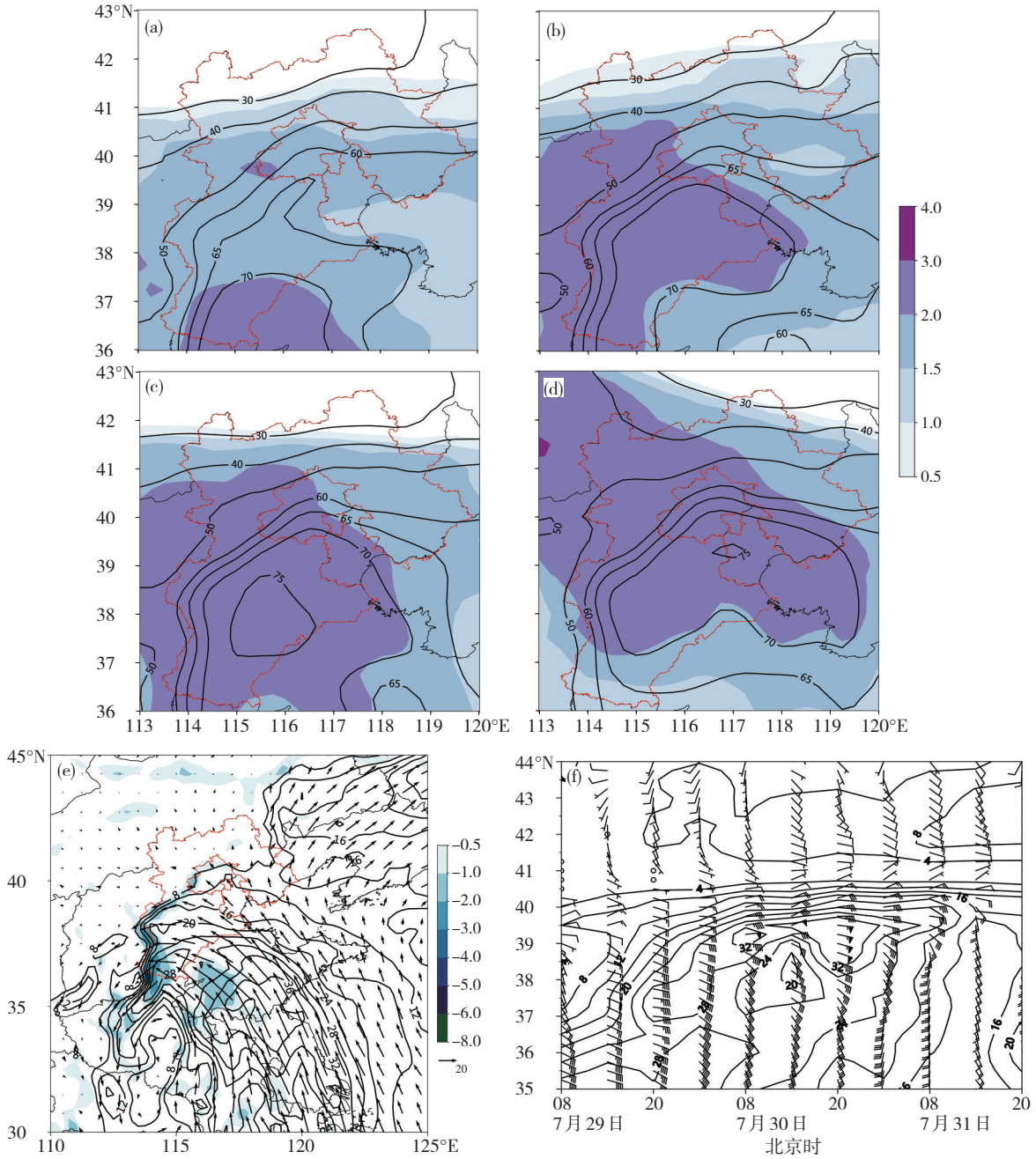


图5 2023年7月29日20时(a)、30日08时(b)、30日20时(c)和31日08时(d)整层气柱水汽总量(等值线，单位：kg·m^{-2})及其相对于气候平均态(1991—2020年)的标准差倍数(填色)，7月29日20时925 hPa水汽通量(等值线，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})和水汽通量散度(填色，单位：10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})分布图(e)，以及29日08时—31日20时925 hPa沿116°E的水汽通量(等值线，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})和风场(风向杆，单位：m·s^{-1})时间演变(f)

Fig. 5 The total column water vapour (contour, unit: kg·m^{-2}) and its standard deviation multiples (color-filled areas) with respect to the historical climate average state at (a) 20:00 BT 29, (b) 08:00 BT 30, (c) 20:00 BT 30 and (d) 08:00 BT 31 July 2023. (e) Water vapor flux (contour, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) and water vapor flux divergence (color-filled areas, unit: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) at 925 hPa at 20:00 BT 29 July 2023. (f) Latitude-time cross section of water vapor flux (contour, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) and wind (wind bar, unit: m·s^{-1}) at 925 hPa along 116°E from 08:00 BT 29 to 20:00 BT 31 July 2023

对其前30 a气候平均态(1991—2020年)的标准差多达2倍。30日,随着台风倒槽北伸,TCWV大值区继续向北发展(图5b、c),北京南部和河北中南部大部地区都达到65～70 kg·m^{-2},其中心值高达75 kg·m^{-2},同样达到了上述气候平均态的2倍。31日08时(图5d),TCWV大值中心主要位于北京、河北中部一带。经分析发现,整层水汽含量的增加与边界层急流的水汽输送有关。29日20时(图5e),对应925 hPa边界层急流(图3a)为一条东南—西北向强水汽通道,水汽通量中心达到36 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1},边界层急流将台风低压携带的水汽输送到河北南部,并在河北西南部太行山东麓辐合。从沿116°E绘制的925 hPa水汽通量和水平风场纬度-时间剖面图上(图5f)可见,伴随边界层东南风急流向北发展,水汽通量大值区向北推进,29日20时位于河北南部,30日08时迅速推进至39°N的河北保定中部附近,急流中心超过22 m·s^{-1},水汽通量大值中心在此处维持时间超过12 h,31日14时后其强度才逐渐减弱。

上述分析结果表明,925 hPa边界层急流将台风低压携带的水汽源源不断输送到河北,自7月30日开始河北中南部和北京南部整层水汽含量普遍超过65 kg·m^{-2},达到其气候态的2倍以上;边界层急流和水汽通量大值区在河北中部维持,为大暴雨区水汽输送提供了有利条件。

4 中尺度特征分析

4.1 强降水的雷达回波特征

图6给出"23.7"暴雨过程台风倒槽影响河北期间京津冀地区雷达组合反射率因子拼图。从中可见,自7月29日20时开始(图6a),随着台风倒槽进入河北南

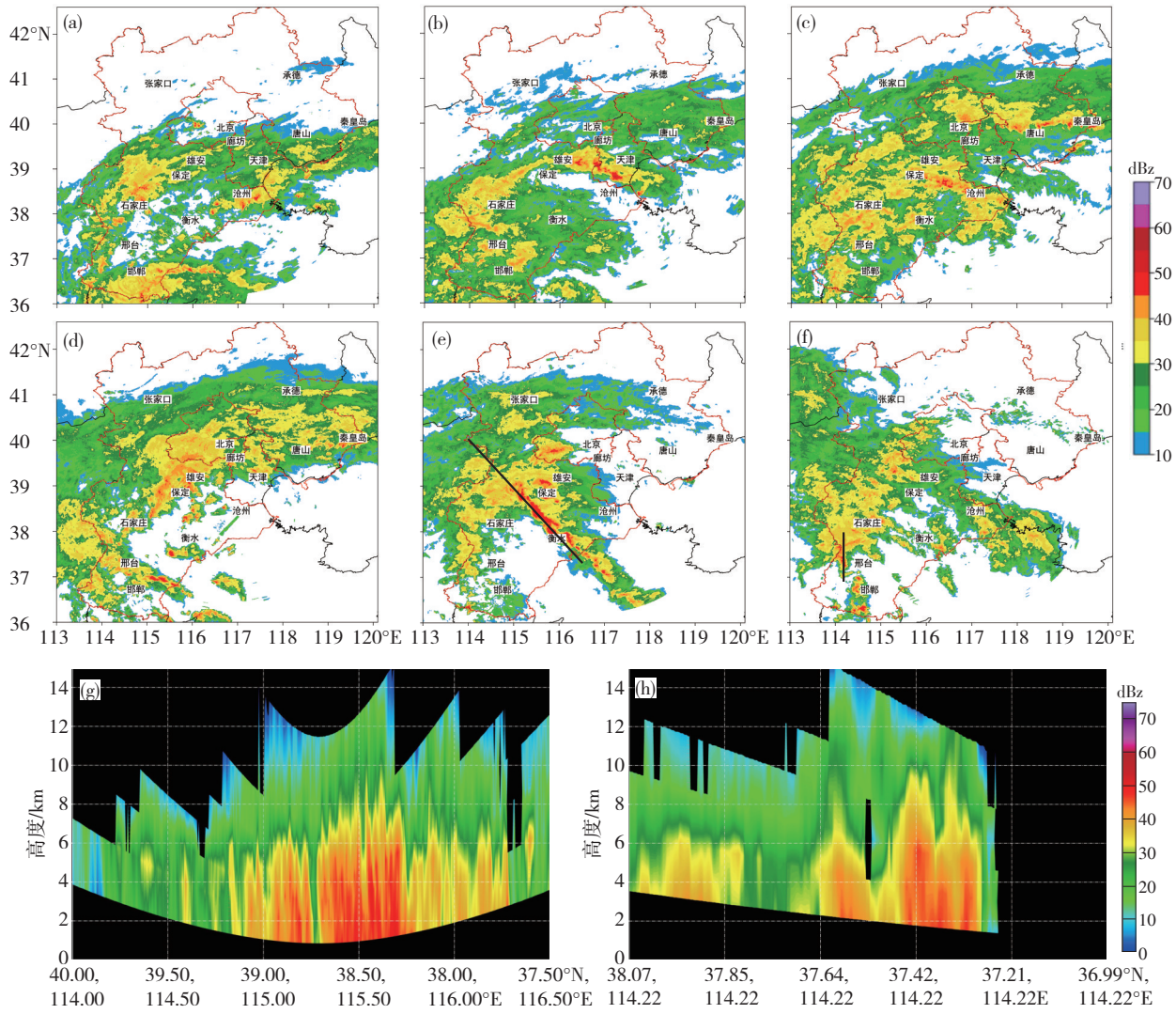


图6 2023年7月29日20时(a),30日02时(b)、08时(c)、14时(d)、20时(e)和31日02时(f)京津冀雷达反射率因子拼图,以及沿e、f中黑线的反射率因子剖面图(g、h)

Fig. 6 Radar mosaic of reflectivity factor (RF) over the Beijing-Tianjin-Hebei region at (a) 20:00 BT 29, and (b) 02:00 BT, (c) 08:00 BT, (d) 14:00 BT and (e) 20:00 BT 30, as well as (f) 02:00 BT 31 July 2023. (g, h) Vertical cross sections of RF along the black solid lines in Fig. 6e and Fig. 6f, respectively

部，密实的降雨回波开始自河北东南部移入，由于此时河北南部CAPE值在1 000 J·kg^{-1}以下(图4a)，对流发展并不是很强，回波强度在30～40 dBz之间，且分布相对均匀，中间夹杂着小范围超过50 dBz的强回波。之后，降水回波逐渐向西向北移动(图6b)，到30日08时其覆盖河北的范围达到最大(图6c)，受其影响，河北大部地面降水维持。30日14时后，降水回波范围开始减小(图6d)，其主要维持在河北西南部太行山前和河北中部地区，此时河北东南部回波中镶嵌着零散的50 dBz以上强回波，并于20时在保定东南部到衡水一线形成西北—东南向强回波带(图6e)。从穿过图6e中强回波中心所作的反射率因子垂直剖面图上(图6g)可见，多个强对流单体排列紧凑，为典型的低质心结构，强回波集中在6 km附近的0 ℃层以下，以暖云降水为主，降水效率高，对应河北中部地面小时雨量最大达到70～80 mm，雨带呈西北—东南向，且长轴方向与回波移动方向一致，形成明显的"列车效应"，河北中部最大小时雨量超过50 mm的站点(图2a)主要由其产生。对比此时低层风场发现，随着台风倒槽北上，河北中部边界层急流明显加强(图5f)，带来更充足的水汽和不稳定能量，30日14时邢台探空CAPE值达到1 079 J·kg^{-1}(图4c)，能量达到最大，此处回波得以发展加强。31日02时(图6f)，保定东南部到衡水一线的西北—东南向强回波带已减弱，河北中部太行山前大片回波维持并缓慢北上，在其南侧邢台西部和邯郸中部仍有分散的对流回波发展，其中大片回波南端的邢台西部带状中尺度对流系统中心强度达55 dBz，并呈现后向传播特征，对应的反射率因子垂直剖面显示(图6h)，发展旺盛的低质心对流单体自南向北依次移过邢台内丘獐么上空，在31日02—03时产生了本次过程110.9 mm的最大小时雨量极值。当日08时后，降水回波主要位于河北中部和北京南部附近，其对河北的影响范围开始减小(图略)。

由上述分析结果可知，由于台风倒槽开始进入河北时本地CAPE不足1 000 J·kg^{-1}，河北南部对流发展不是很强，地面雨强整体平稳。随着倒槽向北推进，河北中部边界层急流加强，加上7月30日午后CAPE略有增大，降水回波在河北保定附近发展加强，地面降水加大，雷达回波呈现后向传播特征和"列车效应"造成河北中部雨强相对更大。由于降水回波在河北西南部太行山前和河北中部保定地区维持时间最长，因此上述两个区域累计雨量相比河北其他地区也最大。

4.2 地形作用

有关太行山地形对华北暴雨增幅的作用，已有不少研究(符娇兰等，2017；栗晗等，2018；Xia and Zhang，2019；苏爱芳等，2022)。由"23.7"暴雨过程累计雨量分布及200 m地形等高线分布(图2e)可知，过程累计降水量超过400 mm的大多数站点都分布在太行山东麓附近区域，尤其是河北西南部站点均集中分布在200 m地形等高线以西。对比7月29日08时—8月2日08时梁家庄站附近同一纬度地形与降雨分布(图7a)发现，太行山东麓累计雨量明显超过地势较低的东部平原地区，累计降雨量超过400 mm的区域主要位于600 m以上山区。另外，30日02时邢台梁家庄站上空纬向垂直剖面图(图7b)显示，900 hPa以下偏东风超过12 m·s^{-1}，而900 hPa靠近山前则超过14 m·s^{-1}，偏东风遇山脉阻挡后转为强的上升运动，上升运动向上发展到500 hPa，其中心强度达到–0.4 Pa·s^{-1}(刚好位于太行山东麓梁家庄附近)，偏东风与太行山地形的相互作用是这一上升运动中心形成的重要原因。

从7月29日06时—7月31日06时邢台内丘风廓线雷达记录的边界层急流演变(图7c)看到，1 km以下东北风边界层急流在29日20时以后开始出现，30日00时边界层急流由东北风转为偏东风，06时偏东风急流加大到18 m·s^{-1}以上，急流一直维持到30日16时前后，对应雷达回波图上梁家庄上空有多个中尺度对流云团移过(图7d)，虽然对流单体发展高度不等，但30～40 dBz回波主要位于6 km以下，对应地面多个时次出现短时强降水(图2c)。

7月30日16时后，随着台风倒槽和低空急流中心北移至河北中部附近，河北南部边界层急流减弱消失，但深厚的饱和层、低的LCL和LFC、一定的对流不稳定能量等环境条件仍未改变，超过8 m·s^{-1}的低层东南风长时间维持，水汽在南北向太行山前被持续抬升，导致层积混合云降水回波长时间维持在山前(图7d)。直到31日02时，整层风向转为南风后，此处持续性降水才逐渐停止。河北南部太行山山脉平均海拔高度在1 200 m左右，且分布有较多向东开口的喇叭口地形，在边界层偏东气流影响下，地形对降水的增幅作用尤为明显。

5 结论与讨论

利用常规地面与探空资料以及区域自动站资料、雷达拼图与ERA5再分析资料等，对"23.7"暴雨过程的降水演变特征、环流形势与环境条件、中尺度特征进行了初步分析，得到以下结论：

(1) 本次河北特大暴雨过程持续时间长、累计雨量大、覆盖范围广，邢台临城梁家庄站52 h累计降雨量高达1 003.4 mm，并有多站突破历史极值。河北中部小时雨强大、降水维持时间长，导致河北中部累计雨

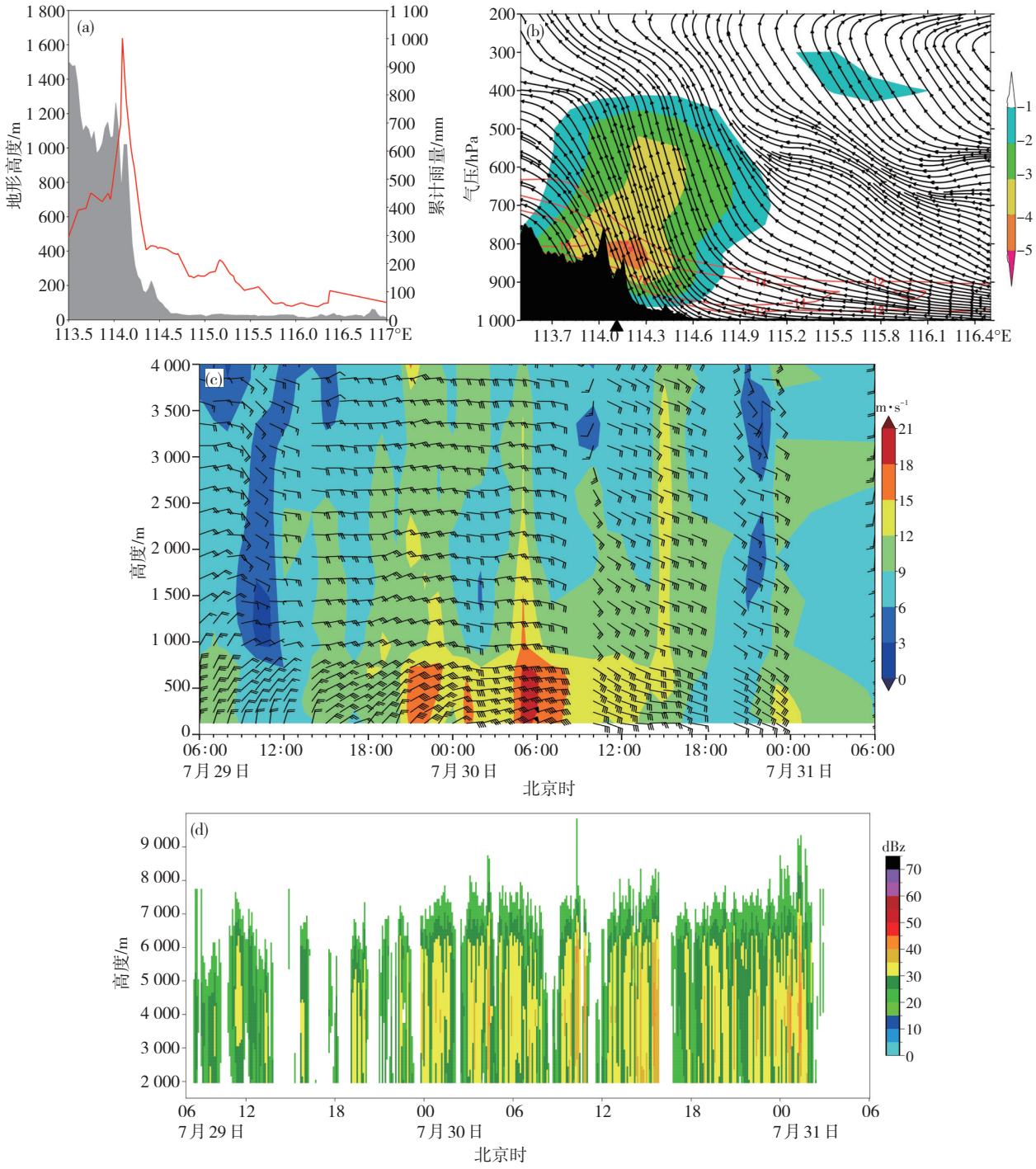


图7 2023年7月29日08时—8月2日08时过暴雨中心梁家庄站的累计降雨量(红线)与地形高度(灰色阴影)纬向剖面图(a),30日02时过梁家庄站的u风(红线,单位: m·s^{-1})、垂直速度ω (彩色阴影,单位: Pa·s^{-1})与u–ω(流线,ω乘以–10)纬向剖面图(b,黑色阴影为地形,▲代表梁家庄站),以及7月29日06时—31日06时邢台内丘风廓线雷达图(c)与梁家庄站雷达反射率因子时间–高度剖面图(d)

Fig. 7 (a) Zonal cross section of accumulated rainfall (red line) from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August 2023 and topographical altitude (grey shaded) cross the Liangjiazhuang station in the torrential rain center. (b) Zonal cross section of wind u (red line, unit: m·s^{-1}), vertical velocity ω (colored shaded, unit: Pa·s^{-1}) and u–ω (stream line, ω multiplied by–10) cross the Liangjiazhuang station at 02:00 BT 30 July 2023 (black shaded denotes terrain, and symbol "▲" marks Liangjiazhuang station). (c) Radar vertical wind profilers at Neiqiu of Xingtai from 06:00 BT 29 to 06:00 BT 31 July 2023. (d) Height–time cross section of reflectivity factor at the Liangjiazhuang station from 06:00 BT 29 to 06:00 BT 31 July 2023

量达到400 mm以上;而河北西南部雨强相对平稳,短时强降水维持时间长是该地区累计雨量大的原因。

(2) 分析特大暴雨出现的环流背景表明,当年第5号台风"杜苏芮"登陆北上,副高与蒙古高压脊相连形成"高压坝",受高压坝阻挡而减弱的台风低压倒槽在河北长时间维持。925 hPa超过22 m·s^{-1}的边界层急

流源源不断将水汽输送到河北，河北大部地区整层气柱水汽总量达到65～70 kg·m^{-2}，达到其气候平均态的2倍以上；深厚的湿层、低的LCL和LFC、弱的0—6 km风垂直切变、一定的对流不稳定能量为强降水的发生提供了较好的环境条件；850 hPa倒槽切变和低空急流在河北长时间维持为强降水提供了辐合抬升条件。

(3) 雷达回波分析表明，降水回波在河北南部分布相对均匀，强度为30～40 dBz；伴随河北中部边界层急流加强，CAPE值增大，降水回波得以发展，暖云降水增大了降水强度，"列车效应"增大了累计雨量。降水回波在河北西南部太行山前和河北中部保定地区长时间维持，使上述两个区域累计雨量最大。

(4) 地形在本次特大暴雨过程中的作用明显。900 hPa以下超过12 m·s^{-1}的偏东风急流受太行山东麓地形阻挡，在降水极值中心梁家庄站附近形成上升运动中心。边界层急流维持期间，多个对流单体移过梁家庄上空，地面多个时次出现短时强降水。边界层急流消失后，由于有利的环境条件没有改变，8 m·s^{-1}的偏东风仍使降水回波在太行山前长时间维持。

在此次暴雨天气的实际预报中，国家及省级预报员已经关注到"杜苏芮"台风登陆北上、华北北部高压坝形成、极端水汽条件存在等因素，但对极值降水的量级与强度估计仍有不足。究其原因，是对此类北上台风减弱低压引发的特大暴雨的形成机制仍然认识不够。本文基于基本观测事实，只是从天气学角度对本次罕见大暴雨过程的降水演变、中尺度特征及成因进行了初步分析，更多问题尚待深入探讨。如，不同天气尺度系统是如何相互作用的，其他环境物理量场到底异常到什么程度？台风"卡努"远距离输送的水汽是否起了作用？导致罕见大暴雨的中小尺度对流系统的触发、组织、维持机制是什么？太行山地形对河北中部强降水的增幅作用有多大？极值中心附近降水的云微物理特征怎样？这些问题都有待下一步综合应用多源资料并采用数值模拟、诊断分析等方法做更深入的探讨，若能通过探讨给出客观定量的研究结果，必然会对此类极端天气事件的预报预警提供更加有效的技术支撑。

参考文献(References)：

湛芸,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:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.10.012

丁一汇.2019.中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J].暴雨灾害,38(5):395-406. Ding Y H. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):395-406 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.001

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]. Meteorological Monthly,43(5):528-539 (in Chinese). doi:10.7519/ j.issn.1000-0526.2017.05.002

孔期,符娇兰,湛芸,等.2022.河南"27.7"特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J].气象,48(12):1512-1524. Kong Q, Fu J L, Chen Y, et a1. 2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan Province during the July 2021 severe torrential rain [J]. Meteorological Monthly,48(12):1512-1524 (in Chinese). doi: 10.7519/ j.issn.1000-0526.2022.101001

雷蕾,孙继松,何娜,等.2017."7.20"华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,75(5):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al. 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016 [J]. Acta Meteorologica Sinica,75(5):685-699 (in Chinese). doi: 10.11676/qxxb2017.054

栗晗,王新敏,张霞,等.2018.河南"7.19"豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al. 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the North of Henan Province [J]. Meteorological Monthly,44(9):1136-1147 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.002

齐道日娜,王秀明,俞小鼎,等.2023.河南"21.7"极端暴雨过程天气尺度系统发展维持机制分析[J].气象学报,81(1):1-18. Chyi D R N, Wang X M, Yu X D, et al. 2023. Analysis of the mechanisms for development and maintenance of synoptic-scale weather systems during the 19-21 July extreme heavy rainfall in Henan, China [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(1):1-18 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220014

苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等.2021.郑州"7.20"极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445-454. Su A F, Lü X N, Cui L M, et al. Prediction and test of optimal integrated precipitation based on similar spatial distribution of precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(5):445-454 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.001

苏爱芳,席乐,吕晓娜,等.2022.豫北"21.7"极端暴雨过程特征及成因分析[J].气象,48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lü X N, et al. 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan [J]. Meteorological Monthly,48(5):556-570 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032501

孙继松,何娜,王国荣,等.2012."7.21"北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,31(3):218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters,31(3):218-225 (in Chinese).

孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498-506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. Torrential Rain and Disasters,36(6):498-506 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.06.002

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).

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.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

汪小康,崔春光,王婧羽,等.2022.“21.7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J].气象,48(5):533–544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al. 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly,48(6):533–544 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.122902

徐珺,李如梦,张庆红,等.2022.从大尺度环流解读河南“21·7”特大暴雨事件的极端性[J].中国科学:地球科学,52(10):1873–1886. Xu J, Li R M, Zhang Q H, et al. 2022. Extreme large–scale atmospheric circulation associated with the "21·7" Henan flood [J]. Science China Earth Science, 65(10):1847–1860 (in Chinese). doi:10.1360/N072022–0025

杨浩,周文,汪小康,等.2022.“21.7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,48(5):571–579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al. 2022. Analysis on extremity and characteristics of the "21·7" severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly,48(5):571–579 (in Chinese). doi:10.7519/ j.issn.1000–0526.2021.111201

杨晓亮,王秀明,杨敏,等.2022.副热带高压控制下河北局地强降水触发与维持机制分析[J].气象48(6):677–690. Yang X L, Wang X M, Yang M, et al. 2022. The trigger and maintenance mechanism of local flash heavy rain under the control of subtropical high in Hebei [J]. Meteorological Monthly,48(6):677–690 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.040101

杨晓亮,杨敏,段宇辉,等.2021a.京津冀一次暖区大暴雨的成因分析[J].暴雨灾害,40(5):455–465. Yang X L, Yang M, Duan Y H, et al. 2021a. Analysis on causes of a warm–sector torrential rain event in the Beijing–Tianjin–Hehei region [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):455–465 (in Chinese). doi:10.3969/ j.issn.1004–9045.2021.05.002

杨晓亮,杨敏,隆璘雪,等.2021b.影响环渤海地区的北上台风特征及其各类典型大暴雨过程分析[J].海洋预报,38(4):99–106. Yang X L, Yang M, Long L X, et al. 2021. The characteristics of northward–moving typhoons affecting the Bohai Rim region and the analysis of various types of related heavy rainfall processes [J]. Marine Forecasts,38(4):99–106 (in Chinese). doi: 10.11737/j.issn.1003–0239.2021.04.012

游景炎.1965.暴雨带内的中尺度系统[J].气象学报,35(3):293–304. You J Y. 1965. The mesoscale systems in heavy rainfall zone [J]. Acta Meteorologica Sinica,35(3):293–304 (in Chinese).

俞小鼎.2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J].气象,38(11):1313–1329. Yu X D. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012 [J]. Meteorological Monthly,38(11):1313–1329 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2012.11.001

赵思雄,孙建华,鲁蓉,等.2018.“7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J].气象,44(3):351–360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al. 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing [J]. Meteorological Monthly,44(3):351–360 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2018.03.002

赵思雄,孙建华.2019.我国暴雨机理与预报研究进展及其相关问题思考[J].暴雨灾害,38(5):422–430. Zhao S X, Sun J H. 2019. Progress in mechanism study and forecast for heavy rain in China in recent 70 years [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):422–430 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.05.004

Luo Y H, Du Y. 2023. The roles of low–level jets in “21·7” Henan extremely persistent heavy rainfall event [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 40(3):350–373. doi:10.1007/s00376–022–2026–1

Wei P, Xu X, Xue M, et al. 2023. On the key dynamical processes supporting the 21.7 Zhengzhou record–breaking hourly rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,40(3):337–349. doi:10.1007/s00376–022–2061–y

Xia R, Zhang D. 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19–20 July 2016 along the Taihang Mountains in North China [J]. Monthly Weather Review,147:4199–4220. doi:10.1175/MWR–D–18–0402.1

（责任编辑　王银平）